Research Reports of Tokyo National College of Technology

東京工業高等専門学校



第 43(2) 号

2012.03

東京工業高等専門学校研究報告書 第43(2)号 目次

時間的余裕のない学習者のための外国語習得法に関する一考察 — Part 3: 初期1年の観察—	ゲイ	์ ツ	ジョ	ン	1
福島第一原子力発電所事故を高専でどう教えるか	前	段	眞	治	5
戦後中小企業政策における組織化政策の展開 一中小企業等協同組合法制定を巡る議論を中心に—	浅	野	敬	<i>→</i>	9
「中国科学技術政策史」の試み(その1)	河	村		<u>豊</u>	19
福島第一原発事故と技術者の美徳・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・]]]	北	晃	司	31
低学年数学学習法指導プログラム	波齋原藤	二藤井川	四敬卓	仁 郎 子 也	45
弱双曲積構造をもつ微分同相写像に対する大偏差原理の上限評価	波止	:元		仁	51
軸流ポンプのキャビテーション発生状況と 壁面圧力変動およびケーシング振動のウェーブレット解析	斉土	藤方	純我	夫 久	59
水撃ポンプの性能に及ぼす圧力タンク内空気量の影響と弁室内流れの挙動	斉高永岩出山土	藤橋田村嶌科方	純正佳拓京貴我	夫旭未哉太裕久	67
光合成を利用した生物燃料電池の試作と動作	角	Ξ		陽	73
東京高専におけるマイクロメカトロニクスの新展開 一第3報,マイクロ加工の適用—	角多齊堤志	田尾藤 村	浩博	陽 進一 貴穣	77

ピエゾフィルムを用いたひずみの可視化と欠陥検出への応用	黒菊原新	崎地 國	亜三広	茂 俊 託 幸	81
高分子圧電フィルムを用いた接着接合部のひずみ分布測定	志有黒	村田崎	克	穣 也 茂	87
地元企業技術者向け機械系工学講座の取り組み	多福志藤鎌大三佐	雇田村野田塚谷木 ¹	勝 千友知桂	進己穰宏詩彦世一	91
ナノインデンテーション法による 単結晶シリコンのマルテンス硬さに及ぼす結晶面の影響	福小角高	田林田畦	勝光 千	己 男 溺	97
偏波保持光ファイバを用いた光マイクロホンの特性評価	新	或	広	幸	103
フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発	伊新	藤國	広	浩 幸	107
化合物半導体GaSのガラス基板上結晶成長	伊	藤		浩	113
アモルファスシリコンを用いて試作したMOSFETの電流-電圧特性	柚	賀	Ē	光	117
マイクロコンピュータ学習チュートリアルWebサイト	小松吉	坂林本	敏勝定	文 志 伸	123
マルチホップ移動体無線通信の一検討 ―身近な通信システムを目指して―	Ξ	中		目 胆	127
理工学教育用シミュレーションソフトの開発	土 清 アレ	屋 藤 クセイ	賢 イル	— 晃 ッカ	135

Research Reports of Tokyo National College of Technology No. 43 (2) CONTENTS

John Gates	·Learning a Foreign Language from a Busy Person's Perspective -Part 3 : Observations from the First Year-	1
Shinji Maedan	·How do we teach the Fukushima Daiichi nuclear disaster at Kosen ? \cdots	5
Keiichi Asano	•The Development of Measures for Small Business Collaborative Organizations in Post War Japan	9
Yutaka Kawamura	•On the History of Science and Technology Policy in China, Part 1	19
Којі Каwакіта	·Fukushima Daiichi Nuclear Accidents and Virtues of Engineers	31
Jin Hatomoto Shiro Saito Keiko Harai Takuya Fujikawa	•A Program of Learning Methods of Mathematics to Early-School Year Students ······	45
Jin Натомото	·Upper bounds on large deviations for diffeomorphisms with weak hyperbolic product structure	51
Sumio Saito Gaku Hijikata	•Occurrence of Cavitation in an Axial-Flow Pump and Wavelet Analysis of Wall Pressure Fluctuation and Casing Vibration Caused by Cavitation ••••••	59
Sumio Saito Masaaki Takahashi Yoshimi Nagata Takuya Iwamura Keita Dejima Takahiro Yamashina Gaku Hijikata	•Effects of the Air Volume in Air Chamber on Water Hammer Pump Performance and Flow Behavior in the Valve Chamber	67
Akira Kakuta	·Prototyping of Photosynthetic Bio Fuel Cell by using Purple Photosynthetic Bacteria	73
Akira Kakuta Susumu Tarao Hirokazu Saito Hirotaka Tsutsumi Jyo Shimura	 New Twist for Micromechatronics in Tokyo KOSEN -3rd Report, Applying to Micro machining 	77

Shigeru Kurosaki Shun Kikuchi Amito Hara Hiroyuki Nikkuni	•Visualization of Strain and Application to Defect Detection Using Piezoelectric Film 81
Jyo Shimura Katsuya Arita Shigeru Kurosaki	Measurement of Strain Distribution on Adhesive Bonded Part using Piezoelectric Polymer Film 87
Susumu Tarao Katsumi Fukuda Jyo Shimura Hiroshi Fujino Chiuta Kamata Tomohiko Ohtsuka Tomoyo Mitani Keiichi Sasaki	An Approach of Mechanical Engineering Related Course for Local Company Engineers
Katsumi Fukuda Mitsuo Kobayashi Akira Kakuta Chika Takaaze	Effects of Crystal Orientation on Martens Hardness of Single-Crystal Silicon in Nanoindentation Method
Hiroyuki Nikkuni ·····	•Characterization of a Optical Microphone with Polarization Maintaining Fiber ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
Hiroshi Ito Hiroyuki Nikkuni	•Development of teaching materials for MOEMS technology using photolithography ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
Hiroshi Ito	•Crystal Growth of Compound Semiconductor GaS on a Glass Substrate ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
Masamitsu Yuga	Current-Voltage characteristics of MOSFET with the amorphous Si built as trial
Toshifumi Kosaka Katsushi Matsubayashi Sadanobu Yoshimoto	•The Tutorial Web Site for the Students Studying Microcomputers •••••• 123
Akira Tanaka	·A Study on Immediate Mobile Multihop Communications
Ken-ichi Tsuchiya Akira Seitoh Illka Aleksi Ylioja	Development of Educational Simulation Tools for Science and Engineering

Learning a Foreign Language from a Busy Person's Perspective — Part 3 : Observations from the First Year —

John GATES*

This paper summarizes the progress, difficulties and major observations from the first year of learning Finnish. The major observations were the importance of using various types of learning resources, having structured study time and previously presented observations of mastering the pronunciation and the effectiveness of Lorayne's memory method for learning vocabulary.

keywords: English education, Finnish, Farber's method, foreign language learning, Kosen, Lorayne's memory method, pronunciation

1. Introduction

It has been proposed [1] that English language teachers should try to learn a new foreign language in order to experience the difficulties that College of Technology (Kosen) students have in learning English. These experiences should help the teacher to find an optimal method for teaching English. As an experiment, the language learning method proposed by Farber [2] was chosen for learning Finnish. After studying Finnish for six months it was observed [3] that the most important first step is to master the pronunciation, that Lorayne's memory method [4] is effective in remembering new vocabulary and the major difficulties are a lack of time and motivation.

This paper summarizes the progress of the teacher learning Finnish for an additional six months and the two major observations made during that time. These observations are that using various types of learning resources at the same time is very useful and that structured study time is necessary in order to progress at a faster rate.

2. Progress Towards the Goals

In a previous paper [1] the fluency targets were set for the four basic skills. The reading target is 200 words in 5 minutes with 70% comprehension. The listening target is 50% comprehension of a newscast. The speaking target is 30 minutes of general conversation and the writing target is 200 words in 20 minutes. Also the first five chapters of the grammar textbook should be studied.

Skill	% (first 6 months)	Achieved (last 6 months)	% (last 6 months)
Grammar	0%	First 2 chapters	40%
Reading	0%	0 words (Did not read any news articles)	0%
Listening	5%	30% comprehension of the textbook's CD	7%
Speaking	2%	Approximately 2 minutes of conversation	7%
Writing	0%	0 words (Not attempted)	0%

Table 1: Fluency level achieved

Table 1 shows the approximate fluency levels achieved in the last six months and

*Department of Liberal Arts (English)

compares them with the fluency levels attained in the first six months. Although Table 1 shows progress in 3 of the 5 categories, the rate of progress is extremely slow. This further validates the conclusion of the previous paper [3] that sufficient time is not being allocated to the study of Finnish.



Fig. 1: Studying time and type of study per week

The amount of study time and type of study for each week for the entire first year is shown in Fig. 1 and is divided into two sections of 26 weeks. From the figure it can be seen that in the first half of the year there were more weeks with more than 300 minutes of study (5 weeks to 3 weeks) however in the first half there were also more weeks with no study time (11 weeks to 7 weeks). This suggests that the motivation to study is increasing and becoming more of a habit.

	First 6	Months	Last 6	Months
	Total (Min)	% of Total	Total (Min)	% of Total
Hidden Moment: Reading while eating	730	18.81	119	3.05
Hidden Moment: Listening while working	2100	54.11	1575	40.34
Hidden Moment: Studying while waiting	280	7.21	1354	34.68
Regular Time: Studying the textbook	656	16.91	600	15.37
Regular Time: Making flashcards	115	2.96	256	6.56
Total Time	3881		3904	

Table 2: Classification of study time

The data shown in Fig. 1 has been summarized in Table 2. From this table it can be seen that the total study time for the first six months and the last 6 months are almost the same. Also the amount of time spent in formal study is also approximately the same (19.87% to 21.93%). However, the most obvious difference is that the amount of study time of listening while working and reading while eating have decreased from 72.92% of the total study time to 43.39%. On the other hand the amount of time spent studying vocabulary written on flashcards while waiting or traveling has increased from 7.21% to 34.68%. The reason for the increase is that the central pillar of Farber's language learning method is to study flashcards whenever possible. The increase in motivation

coupled with the increase in studying flashcards suggests that Farber's method can be used by busy people.

Table 3 summarizes the vocabulary and grammar test scores for each chapter of the textbook and shows that 131 words and phrases were remembered with 79% accuracy in the first six months. However, with the increased amount of time used to study flashcards the number of words studied in the last six months increased to 206 words and phrases with approximately 90% accuracy. Also a score of approximately 95% was achieved on the grammar tests at the end of each chapter of the textbook. These results further verify the effectiveness of Farber's method.

Chapter	Words &	First test: Eng.	Second test: Eng.	Third test: Finn.	Chapter
(half year)	Phrases	to Finn. (%)	to Finn. (%)	to Eng. (%)	Test
Intro. (1 st half)	131	79%	98%	95%	
Ch. 1 $(2^{nd} half)$	111	89%	99%	99%	94%
Ch. 2 $(2^{nd} half)$	95	90%	99%	99%	95%

Table 3: Vocabulary and grammar test scores

3. Observation 1: Using Various Types of Learning Resources is Effective

From Fig. 1 and Table 2, it can be seen that there are three different types of "Hidden Moment" study time. One type is "Listening while working" and means listening to the CD for the textbook while doing something else. In this way many conversations are heard with not much understanding because the material has not yet been studied.

The next type of "Hidden Moment" is "Studying while waiting" which means studying flashcard with unknown words and phrases taken from the textbook. However, since the sounds of the words have already been heard many times usually only the meaning needs to be remembered thus increasing the speed of learning the vocabulary.

The last type of "Hidden Moment" is "Reading while eating" which means reading the textbook [5] or grammar book [6] while eating. This further builds on the phrases that were learned using the flashcards because while reading it is easy to understand which grammar rules are responsible for the changes in the words.

For example consider the phrase "Hän opettaa kemiaa," which means "He teaches chemistry." This phrase was heard many times while listening to the CD. However, since this phrase comes from Chapter Two in the textbook it wasn't studied until the last six months. Even after remembering the phrase the grammar points in the phrase weren't understood until they were read in the grammar book. The main points are the 3rd person singular construction of verbs which is taught in Chapter Three of the textbook. In previous chapters it was taught that "minä opetan" means "I teach" and that "sinä opetat" means "you teach" but that "hän opettaa" means "he teaches" had not yet been studied. Also, the noun "chemistry" is "kemia" with only one "a" at the end, however when it is used in a sentence like this it is changed to "kemiaa" with two "a"s

at the end because this is the "partitive" case of the noun and this was learned by reading the grammar book [6]. In this way a lot of language can be learned without using actual study time.

4. Observation 2: Structured Study Time is Needed for Faster Progress

One of the major differences between a Kosen student learning English and a teacher learning Finnish is that the student is required to attend about 4.5 hours of English lectures per week. On the other hand, the teacher learning Finnish has no structured study time. Also, from Table 1 it can be seen that the progress towards the goal of fluency in Finnish has been proceeding very slowly and the distribution of study time shown in Table 2 reveals that only 15% of the total study time or about 10 hours in the past six months has been spent in concentrated study. If the teacher schedules regular study time and keeps the schedule the conditions will more closely resemble those of the student and the progress should proceed at a faster rate. Therefore, during the next six months, the effects of scheduled study time will be examined.

5. Conclusion and Future Work

This paper has summarized the progress, difficulties and major observations from the first year of learning Finnish. The major observations were the importance of using various types of learning resources, having structured study time and previously presented observations of mastering the pronunciation and the effectiveness of Lorayne's memory method for learning vocabulary.

For future work, the study of Finnish, including structured study time, will be continued and further observations will be recorded. By analyzing this data, new ideas should be generated that can be used to improve Kosen English education.

References

- [1] J. Gates, "Learning a Foreign Language from a Busy Person's Perspective—Part 1: The Method Chosen for Learning Finnish—," *Research Reports of Tokyo National College of Technology*, vol. 42, no. 2, pp. 1 – 8, 2011.
- [2] B. Farber, *How to Learn any Language. Quickly, Easily, Inexpensively, Enjoyably and on your Own.* Citadel Press, New York, NY, 1991.
- [3] J. Gates, "Learning a Foreign Language from a Busy Person's Perspective—Part 2: Observations from the First Six Months—," *Research Reports of Tokyo National College of Technology*, vol. 43, no. 1, pp. 1–4, 2011.
- [4] H. Lorayne, *Super Memory, Super Student*. Little, Brown and Company, New York, NY, 1985.
- [5] T. Leney, *Teach Yourself Finnish Complete Course Package (Book + 2CDs)*. McGraw-Hill, Blacklick, OH, 2004.
- [6] F. Karlsson, *Finnish: An Essential Grammar (Essential Grammars). Second Edition.* Routledge, New York, NY, 2009.

福島第一原子力発電所事故を高専でどう教えるか

前段眞治*

How do we teach the Fukushima Daiichi nuclear disaster at Kosen ? Shinji MAEDAN

The 2011 Tohoku earthquake and tsunami caused the Fukushima Daiichi nuclear disaster. I lectured my students on the Fukushima Daiichi nuclear disaster in physics classes. In this paper, the details of the lectures given by the author are reported. I also show the results of a questionnaire that was taken in the lectures.

Keywords : the Fukushima Daiichi nuclear disaster, Kosen, physics classes

1. はじめに

2011年3月11日14時46分、マグニチ ュード9.0の東北地方太平洋沖地震(東日本大震 災)が発生した。この地震にともなう津波が福島 第一原子力発電所を襲い、約20分後までには原 発1号機、2号機、3号機の全電源が喪失した。 このため炉心を冷却することができなくなり、格 納容器を壊さないために内部のガスをやむを得ず 排気した。その際、放射能(放射性物質)も環境 に放出されてしまい、広範囲に放射能が拡散する 原因の1つとなった。

福島第一原子力発電所事故は、物理を教育・研 究してきた筆者にはとても大きなショックであっ た。それと同時に、技術者を育てる高専で物理教 員をしている者として何をしたらよいか考えたと き、やはり授業の中で今回の原発事故を取り上げ るべきだと思った。2011年3月下旬の物理科 会議でそのことを提案し、1年生から4年生まで の学生に、福島第一原子力発電所事故のことを授 業の中で30分程度話すことになった。各学年の 学生のレベルに合わせて、教科担当教員がそれぞ れ話をすることとした。

本論では、筆者が担当した3年生の学生に授業 で話した内容を報告し、そしてこの原発事故を物 理教育の中でどうとらえたらよいのか検討したい。 2. 授業の中で扱った福島第一原発事故の話

3年生の学生に授業で話した内容を報告する前 に、東京高専の物理関連授業では放射線に関する 教育がどのように行われているかを説明する。2 年生の「物理 II」の後期で原子核の構造を教えて おり、その後、原子核から放出されるα線、β線、 γ線について説明している。放射線にはいろいろ な種類があるが、原発を議論する際はこれらα線、 β線、γ線の話がよく出てくる。2年生では放射 性物質の半減期についても学習している。さらに 3年生の「応用物理 I」(物質工学科は「応用物理」) では、実験テーマの中に放射線関連の実験を1つ 含めている。この実験では放射性物質のストロン チウム90を使って、β線の吸収実験を行わせて いる。福島第一原発事故が起こった今年の前期に この実験を行う前は、学生達が放射性物質のスト ロンチウム90を扱うのをいやがるのではないか と心配したが、学生には放射線源を適切に使えば 心配はいらないと丁寧に説明したところ、混乱も なく無事、実験を終了することができた。

さて、筆者は今年度(2011年度)前期に、 3年生の授業については電子工学科と情報工学科 の「応用物理 I」を担当した。両クラスとも最初 の授業の中で、福島第一原発事故に関する話を4 0分間ほどした。はじめに放射線と放射能の違い について説明した。次に、原子力発電所で熱エネ ルギーを発生させる原理である核分裂反応につい

*一般教育科

て解説を行った。ウラン235の原子核に比較的 速度の遅い中性子を当てると核分裂が起こり、そ の際、膨大な熱エネルギーが解放される。核分裂 反応が起こるとさまざまな放射性物質が生成され るが、報道でよく話題に出てくる放射性物質のヨ ウ素131とセシウム137の特徴を話した。ヨ ウ素131の半減期は約8日と短いが、セシウム 137の半減期は約30年であり、放射能への対 策が何故、何十年も続ける必要があるのかを説明 した。2年生の物理の授業で学んだ放射線関連の 内容が、福島第一原発事故のニュースをよりよく 理解するために役立っていることを学生達に実感 してもらえたのではないかと思う。

3. 学生に行ったアンケートの結果

授業の中ではアンケートも行った。アンケート をとろうと考えた理由は、学生が今回の福島第一 原発事故をきっかけに、原発に対してだけではな く科学技術そのものに対しても否定的な考えをも つようになってはいないかと危惧したからである。

アンケートは2011年4月6日(東日本大震 災から約一ヶ月後)の「応用物理 I」授業中に、 3年電子工学科の学生42名に対して無記名で行 い、有効回答率は100%であった。無回答や悪 ふざけの回答は皆無であり、学生全員がまじめに アンケートに答えてくれた。これは、学生が福島 第一原発事故を深刻にとらえていることの反映で あろう。質問は全部で5問あり、質問内容と回答 結果を以下の(図1)から(図5)に示す。なお、 図中の数値は%を表している。

(図 1) 質問 1. あなたは東北・関東大震災後に 起こった福島第一原子力発電所の放射能漏れ 事故に関心がありますか。



「非常にある」と「ある」を合わせると85.7% に達する。原発の大事故の影響は広い範囲に及び、 しかも何十年もの間、続くことを考えれば、人ご とでは済まされない問題である。「あまりない」と 答えた学生が14.3%いるが、事故の影響を深く 理解することができれば無関心ではいられないで あろう。





「よく知っている」と「ある程度知っている」を 合わせると57.1%である。2年生の「物理 II」 の授業では放射線については比較的、詳しく教え ているが、放射能についてはほとんどふれていな い。少なくとも両者の違いは今後、教えていきた い。

(図 3) 質問 3. 新聞、テレビ報道の中で、半減 期、α線、β線、γ線といった言葉がでてきま す。これらは2年生の物理授業で習いましたが、 覚えていますか。



「よく覚えている」と「ある程度覚えている」を 合わせると83.3%である。2年生の「物理 II」 の授業で詳しく教えたので、「よく覚えている」が (図 4) 質問 4. あなたは技術者の卵として、今後さらに放射能や放射線について勉強していく必要があると思いますか。



「あまりない」や「全くない」は0であった。さ すがに工業高専の学生だけあって、将来、立派な 技術者になるのだという心構えが見て取れる。た とえ将来、原子力関連の仕事に直接、就かないと しても、技術者として放射線や放射能の知識は必 要であると答えてくれた学生諸君を筆者は大変、 心強く思う。

(図 5) 質問 5. 今回の放射能漏れ事故によって、 あなたが持っている科学技術に対するイメージは変わりましたか。



「大きく変わった」と「変わった」を合わせると 38.1%であるのに対し、「あまり変わらない」 と「全く変わらない」を合わせると61.9%であ った。今回の福島第一原発事故によって科学技術 に対するイメージが変わったと答えた学生は、マ イナスのイメージが強くなったのであろう。「あま り変わらない」と「全く変わらない」を合わせた 数が多かったという結果ではあったが、しかし、 「大きく変わった」と「変わった」を合わせた 38.1%の数は少ないと言える数では決してない。福島第一原発事故は我々に、原子力発電のか かえるリスクをいかに適切に見積もり、そして、 そのリスクをどうとらえていけばよいのかという 大きな課題をつきつけている。38.1%の数字の 全部が、科学技術の抱える問題を前向きに解決し ていこうとするものであることを期待している。

4. むすび

今回の福島第一原発事故は東京高専の学生にも 大きな衝撃を与えたが、しかし、予想していた以 上に学生らは今回の事故をできるだけ冷静に受け とめようとしているように思われる。原発が大事 故を起こすとその影響は非常に広範囲に広がり、 しかもそれが何十年もの長い期間続くことを我々 は今回、思い知らされた。原発の是非が今後、ま すます真剣に問われることになるであろう。その ような状況を考えたとき、高専の物理教育は何を すべきであろうか。筆者は、放射線や放射能など の知識を学生に正確に教えることがやはり大切で あると考える。技術者の1人として原発の問題を 理性的に考える際、放射線や放射能などの正確な 知識は必要不可欠だからである。その点で、学生 が今回のアンケートの中、今後さらに放射線や放 射能について勉強していく必要があると全員、答 えてくれたことはとても心強く思う。

(平成23年12月27日 受理)

戦後中小企業政策における組織化政策の展開 一中小企業等協同組合法制定を巡る議論を中心に一

浅野敬一*

The Development of Measures for Small Business Collaborative Organizations in Post War Japan Keiichi ASANO

In the past, research concerning Cyūshō Kigyō Kyōdō Kumiai Hō (Small and Medium-Sized Enterprise Cooperatives Act of 1949) focused its progressive ideas in relation to new, tough antitrust law. However this paper concentrates on the occupation period during which small business policy embraced a mixture of some ideals and aims to demonstrate that:

1. The Ministry of Commerce and Industry and the Small and Medium Enterprise Agency skillfully absorbed the instructions from GHQ/SCAP;

2. Small business wanted cartels as before because it was difficult for them to seek practical benefit from this new cooperative system.

Keywords : small business, small business policy, cooperative

1. はじめに

本論の目的は、1949年の中小企業等協同組合法 の制定過程を検証し、同法制定の意図と意義を再 考することである。

中小企業等協同組合法は、現在に至るまで組織 化政策の中核を成すが、度重なる改正により、制 度内容や実態及びそれに対する評価も複雑なもの になっている。本論の対象とする制定時とその後 の改正についても、戦後中小企業政策の出発点を 経済民主化の成果とする立場からは、独占禁止法 の思想にもとづいた民主的な内容として制定され たものが、次第に経済民主化の要素が骨抜きにな ったとの評価がある¹。一方で、「理想のみ高く、 戦後のわが国中小企業の実態には必ずしも適応し ない点が少なくなかった」ものが、「数次に及ぶ改 正によって、この制度が中小企業の現実に近づい てきた」と、むしろ経済民主化政策からの脱却を 評価する見解も有力である²。

もちろん、これらは、決して対立するだけの見 解ではなく、複雑な内容のいずれを重視するかの 違いである。よって、こうした見解の融合、ある いは折衷が、中小企業等協同組合法の実態に近い ということができる。しかし、本論は、それでも なお従来の研究が、次の問題を残すと考える。 第一は、独占禁止法の「揺り戻し」との関係で ある。1947 年 4 月に公布された独占禁止法は、 米国の反トラスト法と比較してもきわめて厳格な 規定を有していた。日本側は、制定直後からその 緩和を求め、49 年 5 月、第 5 回国会で第一次改正 が実現した。つまり、理想に過ぎた中小企業等協 同組合法は、「揺り戻し」の始まった改正独占禁止 法と同時に成立したものであり、両者の関係を改 めて整理する必要がある。

第二は、GHQ、とくに中小企業政策を所管した 経済科学局(Economics and Science Section)反ト ラスト・カルテル課(Antitrust and Cartels Div.) の影響力の程度とその変化である。占領政策の転 換に伴い、財閥解体や企業分割を重視した経済民 主化政策は一定の役割を終え、日本経済の復興に 重点が移った。こうした変化は、1947年半ばから 徐々に表面化し、1948年12月の「経済安定九原 則」で決定的となった。結果、厳格な独占禁止政 策を維持する反トラスト・カルテル課の姿勢は、 GHQ 内でも少数派になっていく。よって、中小 企業等協同組合法案の検討においては、同課の「理 想」に対抗し得る可能性は高まっていたのではな いだろうか。

そこで、本論は、中小企業等協同組合法制定に

至る環境、すなわち占領政策や独占禁止政策の状況を整理したうえで、法案の審議過程を具体的に 検証することで、①理想に過ぎたとされる中小企 業等協同組合法もすでに「揺り戻し」の要素を含 んでいたこと、②むしろ組合活用のあり方が曖昧 であったためにカルテル組合への願望を温存した こと、の二点を指摘する。

なお、本論は、主な資料として、当時の中小企 業関係の雑誌記事及び国会議事録等を利用する。

2. 占領政策と独占禁止政策の変化

(1) 初期の占領政策

初期の占領政策が、日本の徹底的な改革を志向 したことは広く知られるところだが、改革の進め 方は、分野ごとに違いがあった。たとえば五百旗 頭真は、①GHQ指令型改革、②日本政府先取り 改革、③両者の混合に整理している。そのうえで、 財閥解体や独占禁止法といった経済民主化政策は、 日本の経済力を弱めるものとして、日本政府が最 も消極的な姿勢を見せたとしている³。

また、独占禁止政策は、GHQ による初期の経 済政策を主導したいわゆるニューディーラー、な かでも独占禁止政策を所管した経済科学局反トラ スト・カルテル課の影響を強く受けた。同課の Edward Welsh 課長は、ニューディール期の臨時 全国経済調査委員会(TNEC)や戦時中の価格統制 本部(OPA)でも活躍したエコノミストであり、き わめて厳格な独占禁止政策を志向する典型的なニ ューディーラーであった。Welshをはじめとする、 ニューディーラーの意思は強固で、結果的にはア メリカ本国を超える内容を日本の独占禁止法に盛 り込んだのである。

もちろん、アメリカ政府は、戦争初期から、財 閥解体の必要性を強く認識していた⁴。しかし、財 閥解体や独占禁止政策に対する日本側の抵抗は、 逆にアメリカ側の姿勢を硬化させたことも事実で、 国務省と司法省は、1947 年 1 月、反トラスト派 のCorwin Edwardsを長とする調査団を日本に派 遣した。Edwards は、日本経済では、財閥に限ら ず、あらゆる部面に談合体質が浸透していること を指摘、統制団体の解体や同業組合の規制を含む、 厳格な独占禁止法の制定が必要とした。Edwards 報告は、問題の範囲を財閥からカルテル的行為全 般に拡大したといえる⁵。 Edwards 報告の内容に対しては、GHQ 内部からも疑問が生じた。William F. Marquat 経済科学局長でさえも、日本の政争遂行能力の除去を超えた「理想」を目指すもので、GHQ の体制では実現は困難と難色を示したほどであった⁶。このように、占領初期の独占禁止政策は、GHQ 内のニューディーラーの影響力に、日本側の対応に不満をもった国務省等の姿勢の硬化という要因が加わることで、当時のアメリカ反トラスト法以上に厳格な内容をもつに至ったのである。

(2) 二つの「揺り戻し」

私的独占の禁止及び公正取引の確保に関する法 律は、帝国議会最終日である 1947 年 3 月 31 日に 原案通り可決、4 月 14 日公布、7 月 20 日に全面 施行された。日本側の抵抗も大きな成果を得るこ とはなく、厳格な独占禁止法の内容は、各分野に 大きな衝撃を与えたのである。中小企業の組織化 政策に関しても、1946 年 11 月に制定された戦後 初の中小企業組合制度である商工協同組合は、多 くの組合が独占禁止法の適用除外を満たせない状 況に陥ったのである。

しかし、独占禁止法は、公布・施行とほぼ時期 を同じくして、二つの揺り戻しに直面する。第一 の揺り戻しは、占領政策全体の転換である。アメ リカは、冷戦の激化に対応し、かつ日本占領の負 担を軽減するため、日本経済の弱体化から日本経 済の復興を重視するようになった。たとえば、国 務・陸・海軍三省調整委員会(SWNCC)は、1947 年7月に、日本のアジア貿易を復興し、1950年 までの経済的自立を目標とするSWNCC381を策 定した。SWNCC381は、その後支援規模を縮小 されるが、同月に発表された George Kennan の いわゆる「X論文」とともに、対日占領政策転換 の出発点となった⁷。

第二は、余りに厳格で、非現実的ともいえる独 占禁止法そのものの見直しである。1947年の独占 禁止法は、企業規模を実質的に制限する事業能力 較差の排除(第8条関係)や事業会社の持ち株禁 止(第10条関係)等、アメリカの反トラスト法 でも実現しなかった内容を盛り込んでいた。よっ て、その揺り戻しは、必然であったといえる⁸。ま た、占領政策の転換に伴い、独占禁止政策を主導 したニューディーラーへの批判も強まっていた⁹。 もちろん、こうした政策転換が一気に進んだわ けではない。対日占領政策の正式な転換は、1948 年 10 月 7 日、国家安全保障会議で採択された NSC13/2 を待つことになる¹⁰。実際、GHQ は、 1947 年 7 月時点では、三菱商事と三井物産の解 体を指示し、商工省の「中小企業対策要綱」を統 制的であるとして拒否する等、まさに財閥解体や 独占禁止政策の実行を進めていたのである。しか し、こうした政策実施の一方で、政策立案の場で は 47 年夏頃をピークに変化の兆しが見え始めて いたことを確認したい。

3. 戦後における中小企業組合制度

(1) 商工協同組合法の制定とその問題点

第二次大戦終了時、中小企業の組合制度として は、1943年に施行された商工組合法があった。同 法の組合制度は、統制組合と施設組合の2種で構 成されるが、国家目的を達成するための統制組合 が主流であり、中小企業者による相互扶助的な性 格はきわめて限定されていた¹¹。そこで、政府は 新しい組合制度の検討を開始、1946年8月に商 工協同組合法案を閣議決定、10月に帝国議会で可 決し、11月に商工協同組合法を公布した。

商工協同組合は、戦時統制組織の商工組合とは 異なり、合理化のための共同施設を目的に、任意 加入の組合を組織する内容であった。また、商工 協同組合は、組合への強制加入や組合の強制設立 を規定せず、この点では戦前の組合制度とも違い があった。 しかし、商工協同組合法は、同業組合の解体は 意図していたが、実態としても大企業を含んだた め、独占禁止法との齟齬が生じることになった。 また、戦時の統制組合を実質的に引き継いだ組合 が多いこと、共同施設の設置等に対する具体的助 成策がなく統制や物資割当が業務の中心になった こと等、多くの問題を抱えていた¹²。

(2) 組合制度改正に向けた論点

上述の問題から、商工協同組合法は、制定から わずか数カ月で、改正の必要性が論じられるよう になり、1947 年 8 月 6 日には、商工省から商工 協同組合法の一部を改正する法律案(以下、「商工 協同組合法改正案」という)が閣議に提出された のである¹³。

商工協同組合法改正案の主な内容は表のとおり であるが、独占禁止法との関係において第一の論 点となったのは、加入事業者の範囲である。独占 禁止法は、独占はもちろんのこと、事業者の共同 行為を厳しく規制する内容であったが、同法第24 条は、「小規模な事業者又は消費者の相互扶助を目 的とする」組合については、任意設立、加入脱退 の自由、組合員の平等の議決権等の要件を満たせ ば、適用を除外することを規定した。しかし、商 工協同組合法は、中小企業の組合を想定したもの の、加入事業者の規模を定義せず、実態としても 大企業の加入がみられた。そのため、「小規模な事 業者」の範囲を明確にし、独占禁止法の適用除外 要件に該当する組合とする必要があった。

	商工協同組合法	商工協同組合法改正案	中小企業等協同組合法
	(1946年11月公布)	(1947年8月閣議提出後に廃案)	(1949年6月公布)中の 事業協同組合
目的	共同施設	共同事業	共同事業
加入事業者の 範囲	定義なし	定義なし	従業員 100 人以下 (商業・サービス業は 同 20 人以下)
法人の加入	П	不可	П
組合による 金融事業	न्	不可	म]
設立に関する 行政の関与	認可	認可	届出
組合中央会の 設置	有	無	無

【表】商工協同組合法、商工協同組合法改正案及び中小企業等協同組合法の比較

筆者作成。中小企業等協同組合法は、信用協同組合や企業組合を包含するので、商工協同組合との連続性が ある事業協同組合の規定に限定して比較をしている。 商工省も、加入事業者の範囲については、何ら かの規制が必要との認識をもつに至っていた。た しかに、商工協同組合法は、これについて規定し なかったが、制定時の議会審議では、商工省も「何 等かの方法によりまして、適当なる「コントロー ル」を加えたい」と、次第に大企業の存在を前提 に中小企業の範囲を規定する必要を認めていたた めである¹⁴。ただし、日本側は、「小規模」の範囲 を可能な限り広く、また柔軟に設定できることを 求めたといえる。

これに対して、GHQ は、法人企業の組合加入 は認めない方針であった。日本では、当時でも、 法人であっても中小企業の域を出ない企業は少な くない。たとえば、名古屋を対象とした当時の調 査では、商工協同組合における法人企業の組合員 の割合は、工業関係の組合で22.5%、商工業関係 7.8%、商業関係 3.5%であった¹⁵。一方、事業所統 計によれば、従業者数 30 人未満の事業所が全体 の98%強を占めていた16。よって、商工協同組合 に大企業といえる企業が加入していたことは事実 だが、法人企業のすべてが大企業とは考えられな い。むしろ、個人企業と大差のない法人企業も少 なくなかったといえる。しかし、GHQ は法人す なわち大企業という図式を崩さなかったのである。 商工協同組合法改正案は、こうした GHQ の強硬 な姿勢に沿った内容であった。

もう一つの論点は、組合による金融事業の可否 である。単独での借り入れが困難な中小企業にと って、組合を経由した融資は有力な資金調達手段 であった。とくに、中小企業向け政府系金融機関 が未整備であった当時、商工組合中央金庫の組合 貸付は、組合の実行力に依存する部分は大きかっ たとはいえ、一定の役割を有していた¹⁷。また、 すでに金融事業を行っている組合にとっては、事 業の廃止は大きな混乱を招く懸念があった。

結局、商工協同組合法改正案は、商工省の提出 から2日後、1947年8月8日の閣議で廃案にな り、国会には提出されなかった。GHQ とのさら なる調整が必要なために断念したのか、日本側が 意図的に提出を見合わせたのか、廃案の理由は不 明である。しかし、その内容は、日本側にとって はきわめて厳しい内容であり、仮に成立すれば組 合制度は大きな変化を迫られたと考えられる。

その後も法改正の議論は継続するが、商工協同

組合は、今度は、閉鎖機関の指定拡大や事業者団 体法の制定といった事態にも直面した。組合の中 には、閉鎖機関の指定を逃れるために任意団体へ の改組の動きも見られたが、その場合は事業者団 体法の適用除外を受けられない可能性が高かった。 もちろん、独占禁止法との問題も積み残しており、 商工協同組合は、一層曖昧な立場に置かれた。

しかし、政府は、この時点では、商工協同組合 法の改正には動かず、運用面の対処で乗り切ろう とした。商工省は、各都道府県知事と商工局長に 宛てた1948年2月4日付商工次官通牒において、 統制組合的運用を容認していた従来の方針を転換、

「真に相互扶助の精神にもとづく本来の共同事業 中心の自主的組織に徹せしめることが必要」とし たうえで、「法律改正を見越しての無計画な改組解 散は差控えるよう指導すること」と通知した¹⁸。

結局、1948年中も、種々の議論が繰り返された が、商工協同組合法の改正は実現しなかった。も ちろん、中小企業政策全体としては、1948年8 月の中小企業庁設置という大きな進展があった。 しかし、新たな組合制度については、商工協同組 合法の改正ではなく、新法制定の動きが本格化す る 1949年を待つことになる。

4. 中小企業等協同組合法案を巡る議論

環境の変化

商工協同組合法の改正が先送りされる間も、日本経済は大きく変化した。第一は、占領政策の本格的な転換である。1948年12月、アメリカ政府は、日本経済の本格的復興を目指す「経済安定九原則」を GHQ に指示した。中小企業、とりわけ輸出関連の中小製造業にとっては、インフレ撃退のための引き締め策や単一為替レートの導入に対処すべく、合理化を推進しながら、輸出量を確保することが急務になった。そこで、商工協同組合についても、輸出資金確保や能率向上の実効性を得られるよう、制度改正の必要性が高まったのである。

第二は、アメリカ側による独占禁止政策の見直 しである。アメリカ政府の見直しは、当初は財閥 解体に焦点を当てていたが、1948 年 5 月に来日 した集中排除委員会は、見直しの範囲を独占禁止 政策に拡大した¹⁹。とくに、同委員会が、8 月 28 日にマッカーサー宛に提出した勧告では、「われわ れの見解では、独占禁止法は、その第1条に表明 された基本目的と合致しない規定や言い回し、競 争を阻止し制限する取引規制を行う独占や企業結 合を排除し禁止するための妥当な計画からははる かに逸脱した規定や言い回しを含んでいる」と、 独占禁止法の内容を厳しく批判したのである²⁰。

第三は、外資導入に呼応した、日本側からの独 占禁止法緩和の要求である。元来、日本側は厳格 な独占禁止法の緩和を望んでいたが、外資導入を 名分に、その要求を表面化させたのである。たと えば、1948年6月30日には、経済団体連合会独 占禁止法対策委員会が「独占禁止法改正要望覚書 (案)」を策定、外資導入を理由に、株式所有制限 や役員兼任制限の緩和のみならず、カルテル禁止 の適用除外の拡大、合併不認可要件の縮小等を求 めた。政府も、経済安定本部が、7月23日に「外 資導入に関する独占禁止法の改正に関する件」を 発表、株式所有や役員兼任の制限撤廃を提案した。 もちろん、GHQ、とくに反トラスト・カルテル課 が、日本側の要求を即座に認めたわけではない。 課長の Welsh は、10月2日、中山喜久松公正取 引委員会委員長に対して、独占禁止法に関する行 きすぎた改正要求に警告するメモを送っている21。 しかし、こうした要求が表面化したこと自体が、 政策の転換と反トラスト・カルテル課の影響力の 変化を示すのである。

(2) 論点の変化

中小企業等協同組合法案は、1949年4月28日 に国会に提出された。これは、独占禁止法改正法 案の提出と同じ日である。中小企業等協同組合法 案のうち、商工協同組合の後継制度といえる事業 協同組合の概要は前出の表のとおりである。

法案の国会提出前の論点、すなわち商工協同組 合法が直面していた主な問題は、独占禁止法との 整合性及びそれを実現するための加入事業者範囲 の明確化であった。このうち、法人企業の加入問 題については、1948年初めにはすでにGHQとの 間で決着していたと考えられる。たとえば、1948 年3月の『中小企業』は、「法人加入禁止問題は、 我が国の法人形態が特殊で、しかも規模の小さな ものが多い点を配慮して、最近事情は好転し、工 業では従業員数(事務員を含む)50人未満、商業 では20人未満の会社に限って、組合に加入する ことができるような方向にある。」と記している²²。 次の論点は、規模の程度であった。既述のとお り、GHQ は、きわめて小規模な範囲に限定する 姿勢であった²³。これに対して日本側は、できる だけ範囲を拡大するよう GHQ と交渉を重ねたと いえる。たとえば、1948 年 3 月 30 日の政府答弁 は、「一応いろいろな統計の数字なんかをまとめる 場合には、従業員百人未満の工場を中小企業とい うようなことで、数字を整理しておりまするけれ ども、中小企業対策の対象となるものにつきまし ては、必ずしもそういうような線をおく必要がな いのじゃないか…」と、100 人という線を示唆し ている²⁴。

政府は、この100人の線を維持し法案を作成す るとともに、これ以上の拡大は難しいとの判断に 至ったと考えられる。小笠公詔中小企業庁振興局 長は、1948年末に埼玉県行田の縫製工場等を視察 した際、現地の事業者から「行田の縫製工場の如 きはその業態条件から見てたとえ100名以上の従 業員がいても中小企業形態を一歩も出ていない。 これを緩和する意思はないか」と問われたが、こ れに否定的な回答をしている²⁵。政府は、中小企 業等協同組合法案の提出までに、100人の線は妥 当との見解を固めていたのである。

国会における中小企業等協同組合法案の実質的 審議は、1949年5月7日、衆議院商工委員会で の提案理由説明により開始された。しかし、主に 以下の三つの要因により、中小企業組合制度の中 心となる事業協同組合のあり方については、議論 が深まらなかった。

第一は、中小企業等協同組合法案が、事業協同 組合以外に、保険協同組合、信用協同組合、企業 組合の諸制度を包含したことである。そのため、 議論の大半は、保険協同組合と信用協同組合の問 題に割かれ、審議の場も当初付託された商工委員 会よりも大蔵委員会が中心となった。結局、大手 保険業界の反発が強かった保険協同組合は削除、 信用協同組合は員外利用が多いと考えられた旧市 街地信用組合の分離も議論されたが、移行措置を 付加して信用協同組合の一部とされた。

第二は、企業組合への注目度が高かったことで ある。企業組合は、各企業の事業の一部を共同す る事業協同組合とは異なり、組合員の出資と労働 力の提供により事業を行う組合組織である。第二 次大戦後、類似の組織として合作社が主に社会党 等の革新政党や関係諸団体から提案されていた²⁶。 また、1947年11月の参議院鉱工業委員会は、日本生産合作社理事長杉山慈郎ほかからの陳情にも とづき、生産合作社法の制定に関する特別委員会 を設置した²⁷。稲垣平太郎商工大臣も、中小企業 等協同組合法案提出に先立つ1949年4月7日の 答弁で、「…今度皆様の御協賛を得たいと存じてお ります中小企業協同組合法案等は…その中にはあ る意味において合作社の構想を取入れまして、そ して企業組合というものを構想の中に入れておる のであります」と述べている²⁸。

企業組合の制度は、中小企業等協同組合法案を 直接審議していない予算委員会で注目を集めたが、 その理由は中小企業者の税負担問題にある。当時 は、取引高税や徴税強化の問題から、中小企業の 税負担軽減が各方面から強く要請されていた。企 業組合の組合員となれば法人税ではなく所得税の 課税となるため、中小企業税制が未整備であった 当時においては、とくに零細業者にとって魅力的 な制度であった。稲垣商工大臣も、4月9日の参 議院予算委員会において、「…これによりますと、 結税額はいわゆる法人税でなくて勤労所得税の額 で取られる、こうなりますと、非常にその点は楽 になるのじゃないかと、こんなようなことも一つ の工夫としてやっておるようなわけであります と、企業組合を利用した節税効果を正面から述べ ている29。

第三には、中小企業等協同組合法案の問題点に 対して、商工省や中小企業がすでにある程度の対 応策を用意していたことである。たとえば、GHQ は、早くから、商工協同組合中央会を統制的な中 央集権機関とみなし、法改正時には中央会の廃止 が不可避な状況であった。実際、表のとおり、1947 年の商工協同組合法改正案でも、中央会に関する 規定は削除されている。

しかし、商工省等は、中央会の諸事業を実質的 に移管する組織を準備、1949年3月30日、日本 中小企業連盟(日中連)が結成された。日中連の 会長は、元商工次官でその後は商工中金理事長と 商工協同組合中央会会長を兼ねていた豊田雅孝で ある。日中連は、商工協同組合法の改正が遅れ商 工協同組合中央会が存続したため、しばらくは中 央会と併存、中小企業等協同組合法の施行により 商工協同組合中央会が1949年9月30日に廃止さ れると、中央会の業務を引き継いだ。その後、1956 年に中小企業等協同組合法が改正され中央会が正 式に復活するまでの間、実質的な中央会として政 府の組織化政策に対する中小企業側の受け皿とな ったのである。

また、中小企業等協同組合法案は、組合員の自 主性を重視する観点から員外役員を禁止している が、これについても顧問の選任により一定の対応 がなされていた。小笠振興局長は、従来から広く 用いられている員外役員には専門性の利点と組合 ボスの支配の問題点があるとしたうえで、「…組合 運営上の特別の知識、あるいは特殊な技能を要す るような場合には、いわゆる顧問としてその人の 援助を仰ぐという制度をしいたらどうかと、いう ふうな考え方をいたして、本法案に顧問制度を置 いているのであります…員外理事の問題はこの際 新しい形に振りかえて、組合員をして、組合は自 分たちの組合だという緊迫感をできるだけ強めて 行くことが適当ではないかと考えて、実は本案の ようにいたしたのであります」と述べている30。 小笠は、自主性を強調しながらも、員外役員制度 の代替策を講じたと説明しているのである。

このように、中小企業等協同組合法案の審議過 程を検証すると、「理想のみ高く」とされる制度も ある程度の消化がなされていたと評価できる。一 つは、1947年の改正案から時間をかけて一定の揺 り戻しに成功していたこと、二つは、GHQ が譲 らなかった問題にもそれなりの対応が準備されて いたことである。よって、商工協同組合法が当初 直面した問題からは論点が変化し、また中小企業 等協同組合法案が種々の組合制度を包含したこと もあり、本来の中小企業組合である事業協同組合 のあり方よりも、信用組合や企業組合の問題が論 じられたのである。

(3) 積極的施策の欠如

上述のとおり、中小企業等協同組合法案は、少 なくとも商工省としては、一定の「落とし所」を 得た内容であった。しかし、協同組合による共同 事業や共同施設の具体像及びそれを実現するため の実質的な支援策は、依然として貧弱なままであ った。共産党の川上寛一も、「…そのときに自力だ けでやって行けというようなことは、これはパン を求める者に石を与えるようなものである。吉田 内閣はこういうことをよく好んでおやりになるの でありますけれども、実際にこの組織法のような もので、資金の保障もない。資材の保障もありは しない。そのほか何もない。これで四人や五人の 組合をつくったらできるように書いてあるが、か ようなことで中小企業の組織が一体運用できるか どうか…」と商工大臣の見解を質している³¹。

また、組織化政策が中小企業政策の中核とされ る一方で、協同組合の効果には懐疑的な見方も存 在した。たしかに、小笠は、「…何と申しましても 中小企業個々の力ではやり得ない。従ってこれに 対しまする改善の措置は、中小企業のいわゆる組 織化を中心として考えて行く。その際に組織化さ れたものの技術の改善その他設備の関係に対しま しては、政府は国力の許す範囲において援助をし て行くというふうな態勢を…」と、組織化により 技術の向上が可能と述べている³²。

ところが、中小企業庁長官であった蜷川虎三自 身、「結局、協同組合というものは、中小企業者が 資本の圧力を防衛する。それを突破るという程度 のものでなしに、資本の圧力を防衛するという限 界に止まるということだと思います。」と、消極的 な見解を表明しているのである³³。もちろん、蜷 川は、協同組合自体を否定しているわけではない。 しかし、蜷川の当時の発言をみると、個々の企業 が弱体なままの組織化は無意味であること、金融 支援を欠いていること、大企業の成長がないため に中小企業と大企業が競合してしまうこと、労働 力が過剰で零細企業化が避けられないこと等、組 織化政策単独では効果を期待できないことについ て、学者らしく冷静に分析してみせたのである³⁴。

このように、中小企業者は、積極的な組合支援 策とくに金融助成策を欠いたこともあり、協同組 合の明確な活用方法や期待される効果を見いだせ ない状況であった。そして、中小企業者にとって は、商工協同組合と同様に、結局は統制のほかに は実行可能な事業もなく、カルテル組合へ回帰す る姿勢を温存したと考えられる。

事実、中小企業等協同組合法案は独占禁止法改 正案と同時に審議されたため、早くも、中小企業 に関する独占禁止法や事業者団体法の緩和が話題 となった。横田正敏公正取引委員会委員は、中小 企業育成の観点から見直しが必要との指摘に答え て、今回は実現しなかったが緩和は考えている旨 を明かしたのである³⁵。

5. 中小企業等協同組合法制定後の状況

中小企業等協同組合法は、保険協同組合に関す る規定を削除され、1949年6月1日に公布、7月 1日に施行された。蜷川は、施行に際して、「統制 団体的な要素の一分子も含んでいない」制度であ り、「あくまでも自主的かつ民主的なることを期待」 する一方で、「現状においては難しい点のあること も心しなければならぬ」と述べている³⁶。既述の とおり、蜷川は、組織化の効果について慎重な見 方をしていたが、ここでも楽観論を抑える姿勢に 終始している。

実際、中小企業等協同組合法とその規定する諸 制度は、さまざまな問題に直面することになる。 まず、制定時から論点になっていた旧市街地信用 組合は、預金受入等の制約が強くなり、同法の趣 旨や規定になじまなかった。結局、1951年、新た に信用金庫法を制定し、旧市街地信用組合のほと んどは信用金庫に転換したのである。

新たな制度である企業組合の実態も、少なくとも相互扶助という法理念からは逸脱し、節税組合の様相を呈していた。企業組合を利用した課税逃れについては、法案審議時から懸念はあった。たとえば、社会党の今澄勇は、「…個人の企業、資本家、経営者の同一人に近い同族会社あるいはまたごく親しい人間ばかりでできている株式会社が、課税の都合上あるいは企業組合に登録がえをする懸念がある。そういったような脱法的な一つの行為が、この中小企業の法案で考えられないこともないと思うのでありますが、これに対する御処置はどういうことになりますか。」と、政府の見解を質している。これに対して小笠振興局長の答弁は、実際に発生することはないと楽観的なものであった³⁷。

果たして、実態は、今澄の懸念どおりであった。 中小企業庁も、施行後数カ月で「企業組合の族生 は、当初から予想されたところではあるがやはり 税金対策や、新しいものに対する好奇心が相当大 きな動機になっていることは否定できない」と、 企業組合の税金問題を認めている³⁸。

中小企業組合制度の中心である事業協同組合も 多くの問題を抱えた出発であった。第一の問題は、 事業協同組合が統制機能を持たなかったことであ る。『通商産業政策史』では、事業協同組合の設立 が進まなかった要因として、中小企業の多くが行 政や中央会の指導統制に慣れていたこと、ドッ ジ・ラインの不況下で過当競争にあった中小企業 にはアウトサイダー規制のない組合には魅力がな かったこと、組合経由の資材調達の必要性が低下 したこと等を指摘している³⁹。また、『商工政策史』 も、「中小企業者側からは法制定後もたえず統制立 法措置が要望されたが、そのあげく昭和二十七年 八月別途に中小企業安定法が制定施行され、同法 により生産調整を目途とする調整組合制度が設け られるにいたった」と、統制組合への要求を強調 している⁴⁰。組合の現場も同様の認識で、京都府 商工組合中央会事務局長は、「統制時代の夢さめず」 と統制や物資割り当ての機能がない組合の使い道 を見つけられない状況を伝えている⁴¹。

一方、ドッジ・ラインに伴う金融難を打開する ため、運転資金の調達を目的とした事業協同組合 の設立が相次いだことも確かである。当時は中小 企業向け政府系金融機関が未整備な状況で、組合 経由の融資は、中小企業の重要な資金調達手段で あった。しかし、後の高度化融資等とは異なり、 組合による共同事業等と一体となった金融助成で はなかった。あくまでも、金融助成策の不備を組 合金融の利用により補ったに過ぎない。

このように、新たな組合制度は、企業組合は「税 金組合」、事業協同組合は「金借り組合」と、法の 理念とは乖離した状況であった⁴²。しかし、本来 とは異なる組合制度が、中小企業者の切実な要求 に応えていたことは確かである。

また、政府も、GHQ の経済民主化政策や独占 禁止法に配慮しながらも、組合制度を意図的に「流 用」したといえないだろうか。豊田雅孝は、中小 企業等協同組合法制定時の回想として、日本の商 工業に関する組合法制は、明治三十年に制定され た重要物産同業組合法以来、幾多の変遷があった。 しかし、府県単位の同業総ぐるみの組合制度が、 どの法律においても常に主流をなしていた。それ だから、政府資金の融資を受けるにしても、…組 合員が多数にのぼるため、担保や保証の関係から、 組合員の総意がまとまらぬ傾向が強かった。…4 人以上、中小企業者が集まれば、協同組合が結成 できるという案に、最初から双手を挙げて賛成し、 川原君を電話のたびに終始激励した…」と述べて いる43。回想であることを考慮する必要はあるが、 同業組合的組織ではなく、融資を含む政府の施策 経路としての組合制度を確立しようとする意図を 垣間見ることができる44。実際の施策面でも、1950 年5月に、対日援助見返特別会計の活用により商 工中金の債券発行機能を復活させ、「組合をつくれ ば資金は借りられるという機運を助成した」とい える45。

また、前述の員外理事の問題や中小企業等協同 組合法の特徴である組合設立方法についても、制 定直後から揺り戻しが始まっている。商工協同組 合は設立には行政庁の認可が必要であり、中小企 業等協同組合法の検討段階でも、組合の濫立防止 と行政の関与の必要性を理由に認可制への要望が あった46。しかし、中小企業等協同組合法は、公 証人による定款の認証と行政庁への届出という準 則主義を採用したのである。これについて、中小 企業庁振興部振興課は、「役所の組合に対する権限 がある限り、組合または組合員の方でもどうして も役所に頼る気持ちが捨てきれないし、また役所 の方でも必要以上に組合に干渉し勝ちである」と 説明した47。しかし、中小企業等協同組合法制定 から1年もすると、中小企業庁発行の『中小企業 情報』は、行政庁への設立の届出を確実にするこ と、一定の制限を付けて員外理事を認めること等、 1951 年以降に実現した組合法改正への地ならし を始めている48。

6. おわりに

最後に、冒頭で提示した問題に従い議論を整理 し、理想に過ぎたとされる中小企業等協同組合法 の意義を再考したい。

第一は、商工省や中小企業庁は、1947 年 8 月 の商工協同組合法改正案から 1949 年 6 月の中小 企業等協同組合法制定までの間に、中小企業組合 制度のあり方について一定の「揺り戻し」に成功 していることである。このことは、商工協同組合 法改正案と中小企業等協同組合法の差異からも読 み取れる。また、商工省等の意図を実証するのは 困難と考えられるが、こうした「揺り戻し」は、 アメリカの対日占領政策の転換及びそれに伴う独 占禁止政策や反トラスト・カルテル課の影響力の 変化と、時期を含めて整合する。

第二は、中小企業等協同組合法の規定した事業 協同組合が、本来の目的である共同事業ではなく、 運転資金の調達等で効果をあげたことである。原 因の一つは、共同事業を具体的に推進する施策を 欠いたためで、共同事業と資金助成を一体とした 後の高度化事業等との大きな違いである。このこ とは、当時の中小企業の状況を勘案すればきわめ て現実的なものであったが、組合の活用方法を曖 昧にしたことは否定できない。よって、中小企業 向け政府系金融機関をはじめとする金融助成策の 整備が進めば、必然的に組合金融の役割も低下し、 組合の事業としては、カルテルへの期待が強まる のである。中小企業安定法をはじめとするカルテ ル組合への展開は、経済民主化政策の産物であっ た中小企業等協同組合法から始まっていたと考え られる。

さらに、本論が留意したのは、商工省や中小企 業庁が、GHQの存在という制約に直面しながら も、これを消化し、中小企業への施策経路の整備 としても組織化政策を展開した点である。戦後改 革の影響としては、軍部の一掃、地主層の消滅、 財閥の弱体化等の一方で、官僚機構の継続と経済 分野における国家のコントロール強化が指摘され る。結果として、日本政府は、GHQからの自立 性を強め、参入規制、外資規制及び各種の振興策 や補助金等、国際競争力を強化する施策を早くか ら展開するのである⁴⁹。本論で検討した中小企業 等協同組合法も、中小企業の自主的な組織化にと どまらない、複雑な性格を当初から有したといえ よう。

なお、中小企業組合を巡る論点の変化をより具体的に解明するには、商工協同組合法改正案に関する議論を詳細に検討する必要がある。本稿では、 紙幅の関係で割愛したが、別稿を準備中である。

¹ 黒瀬直宏『中小企業政策の総括と提言』同友館、 1997年、17-20、38-43頁。

² 稲川宮雄「戦後日本の中小企業組織化」加藤誠 ーほか編『組織問題と中小企業』同友館、1977 年、68-70頁。

³ 五百旗頭真『戦争・占領・講和』中央公論新社、 2001 年、336-337 頁。

4 たとえば、1943年5月には、安全保障技術委員 会が、軍事化を支えた資金的基盤の排除を主張し、 同年7月には、戦後外交政策に関する諮問委員会 が、財閥解体と農地改革の必要性を指摘している。 三和良一『日本占領の経済政策史的研究』日本経 済評論社、2002年、274頁。

⁵ Wyatt Wells, Antitrust and the Formation of

the Postwar World, Columbia Univ. Press, 2002, pp.177-179.

⁶ Michael Schaller, *The American Occupation* of Japan: *The Origins of the Cold War in Asia*, Oxford Univ. Press, 1985, pp.39-40.

⁷ Ronald McGlothlen, *Controlling the Waves: Dean Acheson and U.S. Foreign Policy in Asia*, W. W. Norton, 1993, p.29.

8 三和『日本占領の経済政策史的研究』289 頁。

⁹ Wells, Antitrust and the Formation of the Postwar World, p.182.

¹⁰ NSC13/2, "Recommendations with Respect to U.S. Policy toward Japan," October 7, 1948.

¹¹ 稲川宮雄「戦前日本の中小企業組織化」加藤誠 ーほか編『組織問題と中小企業』同友館、1977 年、47-52頁。

¹² 詳細は、浅野敬一「戦後中小企業政策における 組織化政策の始まり一商工協同組合制度の意義と 限界一」『東京工業高等専門学校研究報告書』第 42(1)号、2010年11月、13-22頁。

¹³「商工協同組合法の一部を改正する法律案」は、 国立公文書館「片山内閣閣議書類」及び「昭和 22 年公文雑纂」中のものを参照した。なお、本法案 は、国立公文書館のデジタルアーカイブでも掲載 しているが、現状では不鮮明な画像のため判読は 困難である。

¹⁴「第 90 回帝国議会衆議院臨時物資需給調整法 案委員会議録第 12 回」1946 年 9 月 26 日、193 頁。

15 『中小企業』1948年8月号、7頁。

¹⁶ 総理庁統計局「昭和 22 年度事業所統計調査」 (総理府統計局編『日本統計年鑑 第 1 回』日本 統計協会、1949 年所収)より筆者計算。

¹⁷ 商工組合中央金庫の調査は、同金庫に出資して いる組合のうち 39%が何らかの金融事業を実施 しているとする。商工組合中央金庫調査部「商工 協同組合資産状態総合調査」『中小企業』1948 年 3月1日号、15頁。

¹⁸「商工協同組合法の施行方針に関する件」(国 立公文書館「昭和 23 年・雑・生活物資局」)。な お、当時作成された文書綴りの目録には、「商品協 同組合法」と誤記されている。

¹⁹ McGlothlen, *Controlling the Waves*, p.35.

20 三和『日本占領の経済政策史的研究』151 頁。

²¹ 三和『日本占領の経済政策史的研究』155 頁。
 ²² 『中小企業』1948 年 3 月号、3 頁。

²³ GHQ の当初案は 5 人、二次案でようやく 19 人であったという。稲川「戦後日本の中小企業組 織化」64 頁。

24 「第2回国会衆議院商業·鉱工業委員会連合審

査会 2号」1948年3月30日、3頁。ただし、本 答弁を含め、この時期の政府の発言からは、量的 基準を用いずに中小企業の範囲を規定しようとす る意図がうかがえる。この点については別稿で論 じたい。

25 「「足袋の行田」の実態調査―小笠振興局長、

長村繊維局長と共に」『日本中小企業新聞』1949 年2月1日、2面。

²⁶日本社会党政務調査会「産業復興はこれでゆく」 『社会新聞』1947年9月8日、1面、国民経済会 議、中小工業専門委員会「中小工業対策に関する 件」1948年2月24日(『片山芦田内閣期経済復 興運動資料第2巻経済復興会議(2)』より)。

27「第1回国会参議院鉱工業委員会第15号」1947 年11月5日、1頁。ただし、このときは、法案提 出等には至らなかった。

²⁸「第5回国会衆議院予算委員会第6号」1949 年4月7日、13頁。

²⁹「第5回国会参議院予算委員会第8号」1949 年4月9日、13頁。稲垣は、衆議院予算委員会で も同様の答弁をしている。「第5回国会衆議院予 算委員会第6号」1949年4月7日、13頁。

³⁰「第5回国会衆議院商工委員会第13号」1949 年5月12日、5頁。なお、中小企業等協同組合法 案第43条は次のとおりで原案のとおり成立した。

「組合は、理事の過半数の決議により、学識経験 のある者を顧問とし、常時組合の重要事項に関し 助言を求めることができる。但し、顧問は、組合 を代表することはできない。」

³¹「第5回国会衆議院商工委員会第14号」1949 年5月13日、8頁。

³²「第5回国会衆議院商工委員会第13号」1949 年5月12日、3頁。

³³「中小工業の将来と中小企業庁」『中小工業講 演』第1号、1948年12月、13頁。

³⁴「第5回国会参議院経済安定・商工委員会連合 審査会第1号」1949年4月25日、6-9頁。

³⁵「第5回国会衆議院経済安定委員会第13号」
 1949年5月9日、2頁。

³⁶「活用による現状打開を一中小企業等協組法の 施行に際して一」『日本中小企業新聞』1949 年 7 月1日、1面。

³⁷「第5回国会衆議院商工委員会第13号」1949 年5月12日、4頁。なお、今澄は、企業組合を相 互扶助組織とするのであれば、法人税は35%の一 般税率ではなく、25%の特別税率にすべきと指摘 している。

³⁸「新協同組合の設立状況」『中小企業情報』第2 巻第1号、1950年1月、31頁。記事の執筆は中 小企業庁振興部振興課、1949 年 11 月 15 日付で ある。

³⁹ 柳沢遊「中小企業の政策」通商産業省編『通商 産業政策史・第3巻・第I期・戦後復興期(2)』通 商産業調査会、1992年、658頁。

40 通商産業省編『商工政策史・第12巻・中小企業政策』商工政策史刊行会、1963年、409頁。
 41 渡辺伸雄「新組合移行状況一京都の展望一」『日

本中小企業新聞』1949年10月1日、1面。 ⁴²加藤誠一「中小企業の組合制度と任意団体」、

楫西光速ほか編『講座 中小企業 2─独占資本と 中小企業─』有斐閣、1960年、276-277頁。

⁴³日本中小企業団体連盟編『社団法人日本中小企 業団体連盟三十年史』日本中小企業団体連盟、 1979年、57頁(初出:豊田雅孝「川原事務官の

1979 中、57 頁((初田・豊田福季)) 川赤事務官の 思い出」(中小企業等協同組合法制定 25 周年の記 念随想)『中小企業と組合』1974 年 7 月号)。

44 政府の施策経路という観点では、問屋勢力の主 導する同業組合的なカルテルには反対しても、後 の中小企業安定法等にみられる政府主導のカルテ ル組合は推進することになる。

45 加藤「中小企業の組合制度と任意団体」277 頁。 46 商工協同組合中央会関東信越ブロックからの 建議書は、「商工協同組合法改正案において組合設 立は地方行政庁の認可制度とせられ度。」「自律自 存の能力に乏しくして中小企業庁をはじめとする 行政官庁の指導援助なくしては到底合理的運営が できない」としている。「中小企業協組法に要望」 『日本中小企業新聞』1949年3月1日、2面。

⁴⁷「協同組合のあり方」『中小企業情報』第1巻 第8号、1949年9月、8頁。

⁴⁸「協同組合法はかく改正すべし」『中小企業情報』第2巻第8号、1950年8月、9頁。

⁴⁹ Bruce Cumings, "Japan and the Asian Periphery," in Melvyn P. Leffler and David S. Painter, eds., *Origins of the Cold War: An International History*, Routledge, 1994, p.230.

(平成24年1月5日 受理)

「中国科学技術政策史」の試み(その1)

河村 豊1)

On the History of Science and Technology Policy in China, Part 1.

Yutaka KAWAMURA

This paper discusses the history of Science and Technology Policy in China from 1959 to 1976. Chinese Science and Technology Policy and the Plans started out as the emergency countermeasures for the nuclear weapon of USA and USSR at 1950's. On the other hand, most of the plans experienced resistances from the Big Breakthrough Movement or the Great Culture Revolution. They successfully got the nuclear weapon and ICBM, but many of Chinese Science and Technology Plan did not progress at all. In this paper I pointed out the factor of these bilateral characters.

1. はじめに

「仲良くなりたいとは思うが,なかなか友人になる ことができない隣人」.近年の状況を考えると,日本 人が感じる中国人への感覚は,こう表現できるので はないだろうか.

日本の将来を考えるとき、「隣人」である中国の人 々とは「運命を共にする友人」であり続けるだろう. 歴史的な経緯を見ても日本は多くの影響を中国か ら受け、また中国にも影響をもたらしてきたからだ. だとすると、その影響を良いものにするにはどのよう な工夫が必要なのだろうか.理解し合える友人にな るためには「相互理解」は不可欠の要素である.そ の第一歩は「相手の考え方」についての理解、この 場合は日本人が中国人のものの考え方を理解する ことではないだろうか.

本論考は,東京高専で 2011 年度の教養ゼミII (科学技術論)において取り上げた「諸外国の科学 技術政策史」²⁰ を実施するために河村が準備した 資料から,中国のみを対象として,さらに文献調査と 検討を加えた成果である.中国に対するイメージ が、マスコミの断片的でやや一方通行の情報だけで 決まってしまっている現在、中国人のものの考え方 をより冷静に理解するために、歴史分析の手法も必 要である.そこで 1950 年代から最近にかけて行っ ている科学技術政策が、どのような中国側の「危機 感」の中で策定されてきたかを描いてみようと考え、 執筆したものである.

(1) 中国側からみた中国の科学技術

まず最初の作業として、中国における近年の著し い科学技術発展について、中国側がどのような分析 を行っているかを概観しておきたい.

2004年に中国工程院のアカデミー会員 584人 が「中国の10大科学・技術成果」を選んだ一覧がある(表1). ³⁰それによると,スーパーコンピュータお よびネット関連技術等の「情報通信技術」,またナノ 材料,物質の構造解明研究などの「素材技術」,さら に核技術・宇宙技術・海中での誘導技術などの「軍 事技術」,天然ガス調査・輸送技術などの「エネルギ ー関連技術」において,成果が上がっていると中国 側が評価していることが覗える.

確かに、核技術や宇宙技術については、1964

1) 一般教育科(人文社会)

- 2) 受講生による発表資料を「各国科学技術政策史 2011 年度 8 カ国調査」としてまとめ、本校のサーバーに保存(および限定公開)してある. http://xythos.tokyo-ct.ac.jp/xythoswfs/webui/_xy-2368718_1-t_YiuVAJd9
- 3) 『中国 2005』新星出版社出版(日本語版), 2005年, 217p.中国工程院(The Chinese Academy of Engineering) は, 1994年に中国科学院から独立した組織.現在の中国における工学分野の指導組織となっている.

年の原爆実験(仏に次ぐ5番目),1967年の水爆 実験(英に次ぐ4番目),1970年の人工衛星打ち 上げ成功(日本に次ぐ10番目)という実績があり, また2003年には有人宇宙飛行を成功(米に次ぐ3 番目)させており,中国が世界のトップを競う技術を 持っていることは,中国側の過大評価であるとは言 い切れないだろう.

表 1

(1)超高速(スーパー)コンピュータシステム
(2)国産商業用原子力発電所の稼働
(3)総延長 4000 キロの天然ガス輸送プロジェクトの
正式運営開始
(4)次世代インターネットの立ち上げ(CERNET2
の構築)
(5)宇宙衛星「探測2号」の打ち上げ成功
(6)ナノ材料「スーパー・スイッチ」の開発に成功
(7)高精度水中位置測定・誘導システムの開発成功
(8) 膜蛋白結晶体の構造解明
(9)中国科学技術大学における量子情報実験分野
での成果
(10)中国海域の石油・天然ガス資源(埋蔵量)の戦

その一方,中国側からの厳しい評価もある. 李非 (中国南開大学助教授)は、中国を「工業化し, 技術を十分自足している途上国」であると評価する のは間違いであって,「半ば工業化し,技術を部分 的に自足している途上国」と評価すべきであると主 張している(2001年現在).

略的調査

具体的には,自然科学系独立研究開発機関の 数は4,850カ所(国防除く,1995年末現在)と多い が,そのうちの820の機関は研究開発活動(R&D) はせず,論文を発表していない機関が44.6%もあ るという(1993年現在).さらに,技術開発力の1つの 指標である,研究開発費の対 GDP 比で比較する と、中国が 0.69 %(1998 年)であるのに対して、 OECD 諸国の平均が 2.0 %(1981 年)、韓国が 2.58 %(1994 年)、そして台湾でも 1.80 %(1994 年)、インドでさえ 0.89 %(1995 年)であって、インド よりも低いことを重く捉えている. 金額でみると、中国 の研究開発費は約 58 億米ドル(1998 年)で、イン ドの場合の約 74.5 億米ドル(1995 年)よりも、17 億米ドル低いことになる.

改革開放以来,大規模な科学技術政策を展開したにもかかわらず,1995年から2000年までの時期では,低迷状況に止まっていると指摘している. 低迷の理由として李は,政府官僚が科学技術を軽視してきたこと,研究開発資源のほとんどが中央政府直轄の機関に限定されてきたこと,研究開発活動と企業経営とのつながりが小さいことを指摘し,これらの問題の本質には,政府官僚主導の科学技術体制があり,改善には市場化の導入が必要であると主張した.

中国の科学技術は一部の先端技術では世界水 準に達しつつあることと評価しながら,研究開発体 制および研究成果の工業化は遅れていることを中 国側は認識しているようである.こうした認識を「二面 性」と表現しておきたい.

(2)日本側からみた中国の科学技術

2003 年に国家主席となった胡錦濤(Hu Jintao, 1942-)のもとで,中国は「創新型国家」を目指すた めに新たな科学技術政策を立案・執行した(2006 年).「創新」とは innovation (技術革新)を意味し ている.こうした 2003 年以降の中国の新しい動きに ついて,日本側がどのような評価をしているか 2 種 類の分析を比較してみたい.

まず,科学技術振興機構の中国総合研究センタ ーが行った 2009 年の分析がある.

中国の研究開発費総額は急増しているが日米欧 に比べまだ少なく,基礎研究費が少ない.企業の研 究開発費が先進国並みとなっているが一部の企業

¹⁾ 李非(中国南開大学助教授)「中国における研究開発体制の特徴点」アジア文化研究, Vol. 8 (2001) No. 8 pp.221-234.

²⁾ エネルギー資源などのように国家にとって不可欠な事項については、市場メカニズムや民間企業にまかせるのではなく、中国 政府が直接的に関与すべきと政府の役割を認めている論者もある(郭四志『中国エネルギー事情』岩波新書、2011 年 1 月、 p.23). これに対して李は、「完全に市場システム化を実現するまで」問題が解決しないと論じている(同上 p.231). 科学技術 に関わる問題をすべて民間主導に依存できるとの主張がまだ説得力のない現状では、将来像として展望する場合、民間企業 を育成した上で、政府の関与と市場の関与とのバランス論を構築する必要が中国にはあるのではないかと筆者は考えている.

に偏っている.また研究者数では,日本の約2倍で,優れた人材が多く,若手の活躍が際立っている.研究論文数では,日本などと同水準で,相対被引用度も増加しているが,まだ日本に比べて低い.研究分野では,材料科学,化学,数学,工学,物理学において存在感を増しているが,ライフサイエンス分野ではまだ低い.中国の産業技術では,まだ技術導入が中心で,自前のイノベーションは今後の課題である.ただし,中国政府が先端技術分野を重点分野として取り組んでいるので,より活発化するとみられる.¹⁰

つまりこの報告書では、客観的なデータを踏ま え、中国の科学技術分野が、一部で急速な発展を 遂げながらも、他方では弱点が存在しているという 「二面性」を紹介しているといえる.この「二面性」を 別の視点から考察した論者が、伊佐進一である.

2007年から科学技術担当の一等書記官として 在中国大使館に所属していた伊佐進一は、「こん な国で科学技術が発展することなんてあり得な い」という疑問と、「この国の発展の可能性はす ごい」という驚きとの両面を感じたという.

伊佐が関心を置いているのは、「日本が科学技術 によって再び復活するためには、中国とどう協力し ていくべきか」という点である.こうした視点は、中国 の科学技術の急成長を、単に日本の競争相手とし て論ずる「脅威論」とは異なり、対立を極力減らして 協力関係を築こうとする「互恵構築論」とでも言える. この視点は本論考の問題関心とも共通する.ただ し、伊佐の結論は、次のような日本に向けた提案で ある.つまり、日本が持っている過去の経済成長期 の成功体験、発展させてきた技術への過信を捨て、 新しいイノベーションの時代を、日中の協力で迎え るべきだ、そのためには「オープンイノベーション」 (外部の研究開発活動を利用する開発手法)を採用 できるように、日本側の体制を整える必要がある、と いう主張である.

さて、「中国の科学技術」に関わるいくつかの分析 事例を検討する中で、「二面性」という特徴が指摘さ れていることは確認できた.しかし、中国科学技術に ある「二面性」の背後にどのような問題が存在してい るかについては、まだ分析されていないといえる.そ こで、以下では、中国科学技術の背後にある「科学 技術政策」を歴史的に調査し、中国政府の判断がど のようなものだったのかを検討してみることにする.

まず、「科学技術政策」とはどのような起源をもち、 国家にとってどのような役割を持つのもであるのかを 理解しておく必要がある.その上で、中国が自国の 科学技術政策をどのように策定し、実行し、あるいは 実行できなかったのかを概観し、その背景にある「危 機感」を探りながら分析することにする.こうした分析 を通して、中国政府のものの考え方の一端でも理解 することができれば、中国との相互理解の糸口が見 えるかもしれないからである.

2. 科学技術政策とは

教育政策や産業政策とは独立した形で,狭義に 科学技術政策を捉えるとすると,科学技術政策は 1930年代に登場したといえる.³⁰

ここで言う「科学技術政策」とは、科学技術の政治 的,経済的役割に期待して行われる、若手科学技 術者の養成、研究者の配置転換(あるいは動員), 基礎研究の実施などの「将来投資計画」を策定・実 施する政府の活動、さらに具体的な開発プロジェク ト計画を含む政府の方針である.したがって、通常 の産業政策や特許政策とは異なり、また大学等にお ける教育政策や研究促進策とも区別されるような、

- 1)科学技術振興機構研究開発センター中国総合研究センター中国科学技術力研究会編『中国の科学技術力について』、科学技術振興機構情報提供部,2008年12月,159p. さらに詳細なデータ分析を行っている報告書として以下の2点があり、中国の科学技術についての現状を理解する上での基礎資料といえる、独立行政法人科学技術振興機構中国総合研究センター編『中国の科学技術分野における施策の現状及び動向調査報告書』2009年6月,233p.独立行政法人科学技術振興機構中国総合研究センター編『中国総合研究センター編』で成22年版中国の科学技術の現状と動向報告書』2010年4月,725p.
- 2) 伊佐進一『「科学技術大国」中国の真実』講談社現代新書, 2010年10月, 268p.
- 3) 武安義光「科学技術政策」平凡社世界大百科事典オンライン, http://www.mypaedia.jp/netencyhome/. なお「科学技術」 の意味としては、「科学と技術」と「科学依存型技術」の2つの使い分けが可能である. 本論考では主に「科学と技術」の意味を 持つものとして利用している.

計画的・総合的な政策という特徴をもつ. それゆえ 科学技術政策は、「通常」とは異なる社会状況に対 応して、科学技術を利用する緊急対策、特例措置と いう形で登場している.

典型的な事例は、アメリカ大統領のルーズベルト が設置したとされる「大統領科学技術諮問会議」 (1933年)や「国防研究委員会」(1940年6月)であ る. 後者の国防研究委員会は、大学所属の物 理学者を一時的にレーダー開発や原爆開発に動員 する仲介機能を果たし、戦時中における新兵器開 発を目的した軍事技術中心の科学技術政策に関わ る最初の組織で、戦後の冷戦期にも受け継がれる 一つの典型例であったといえる.

一方,日本では,日中戦争が勃発した1937年に 設置された企画院科学班,1938年に設置された 文部省科学振興調査会,さらに1943年に閣議決 定された「科学技術新体制確立要綱」などがあっ た.この「要綱」の基本方針の1つ「科学技術研究の 振興方策」には,「基礎研究の充実および応用研究 との連絡進展」,「工業化研究の振興」,「研究者技 術者の養成配置」,「研究費の優先的配置」,「研究 用資材の優先確保」,「技術発展のための研究事項 の企画」,「研究補助ならび奨励」,「科学技術能力 拡充と科学技術者の表彰」が加えられており,戦後 に本格化する民生技術中心の科学技術政策の一 つの典型例といえる.

アメリカの事例の場合は、特定の新兵器開発を目 指すために、それに必要となる基礎研究(目的基礎 研究という)を含めた開発計画を、政府主導によって 実施する方式である.一方、日本の事例の場合は、 資源や装置類の輸入途絶にともなう「国内化」、「国 産化」を目指したもので、そのための基礎研究振 興、工業化研究振興を政府主導で行う方式である. アメリカの場合も日本の場合も、ある課題を解決する ために政府が指令を出して実施することから、「使命 指向型(mission-oriented)研究開発」を特徴とす

る科学技術政策といえる.

こうした科学技術政策が戦争の中で登場したということは、これまで研究者の好奇心に依存していた 基礎研究活動に、危機回避を理由に政府が基礎研 究振興として乗り出したことを意味する.また、必ず しも確実な成果が期待できないであろう基礎研究分 野に税金を投入するほどの必要性を政府が認識す るようになったことも意味している.基礎研究であると いう特徴から、成果を生み出すまでの政策は、必然 的に中長期的な対策となり、基礎研究の振興、その ための研究人材の養成、研究施設の整備、関連組 織の再編成、法制度の変更、民生分野と軍事分野 との調整、海外との連絡強化などの総合的な施策を 含む.そしてこのような中長期的な施策、「明日への 投資」を遂行しようとする動機には、戦争という大き な「危機感」が一つのきっかけであった言えよう.

こうした科学技術政策の登場の特徴をふまえ,次 節では、中国政府が中華人民共和国として建国し て以来、どのような意図をもって、科学技術政策を 策定、実施してきたのかを時代ごとに振り返り、その 時代において、どのような「危機感」を中国側が持っ ていたのかを推測してみたい.

3.「中国」の科学技術政策の起源

(1) 中華人民共和国建国まで

1930年代から中華人民共和国の建国後の数年間までは、中国では「科学技術政策」は策定されなかった.もちろん科学研究組織である中央研究院(1928年発足)や、高等教育機関である北京大学(1898年設立)、清華大学(1919年設立)は活動していた.ただし、政治的混乱期から日中戦争、内乱期中は、科学者を動員して技術開発などを実施させるような科学技術政策は存在しなかったと考えて良い.一方 1945年までの時期、「満州国」(1932-45)には大陸科学院(1935設立)、「汪兆銘政府」(1940-45)下では、上海自然科学研究所(1937

2) 鈴木淳『科学技術政策』山川出版社、日本史リブレット、2010年6月、112p.河村豊『第二次大戦期日本における戦時科学動員に関わる実証研究』2007年3月(科研費報告書)、215p.戦時中における日本の科学技術政策は戦争遂行を目的とした代用品開発を含めた資源獲得が中心であったが、アメリカ型の新兵器開発に科学者を動員した事例も存在している.詳しくは、河村豊「レーダー開発計画の決定過程-太平洋戦争直前期の旧日本海軍の取り組み-」科学史研究、第38巻No.211、1999年秋、pp.165-172、を参照のこと.

¹⁾ 山崎正勝,日野川静枝編『増補 原爆はこうして開発された』青木書店, 1997年5月,p.37

設立)があり、それらの組織で中国人研究者も研究 活動を行い、大陸科学院では政府主導の科学政策 が部分的に実行されていた.しかし、実質的には日本の傀儡政権下での活動であり、日本軍部、日本 政府の政策であったといえる.

1946年6月から中国国民党と中国共産党との 間で内戦が勃発した.その後,1949年10月に共 産党による中華人民共和国が成立,同年12月に は国民党政府が台北市に首都を移したが,朝鮮戦 争勃発(1950年)によって中国の内戦が中断するま で戦闘状態が継続していた.それゆえ,この間も政 府による科学技術政策は策定されることはなかっ た.ただし,その後に活躍する科学者が避難先から 各地の大学に戻り,教授などの役職に復帰してい る.1949年の建国時点で中華人民共和国側に戻 った研究者で,欧米での留学を経て帰国し,その 後,科学技術政策に影響力を持った研究者を4人 を紹介しておく.

(1)李四光(Li Siguang, 1889-1971)

蒙古族出身の地質学者. 1902 年に日本の大阪 高等工業学校(後の大阪大学工学部)に留学. その 後イギリスのバーミンガム大学での留学を経て, 1920 年に中国に帰国,北京大学に着任,中央研 究院の研究員(中国語で院士)として活動. 1932 年には,南京大学総長を勤めた.中国建国の年 (1949 年)には,新設の中国科学院副院長となり, 地質学研究を応用した石油やウラン鉱石などの探 査を行うほか,科学技術政策の策定に関与した.

(2) 呉有訓(吴有训, Wei Yongkang, 1897-1977)

1920年に南京高等師範学校(現在の南京大学) を卒業後,1921にアメリカのシカゴ大学に留学, 1925年に博士号を取得し,翌26年に帰国.清華 大学教授(戦時中は西南連合大学所属),1950年 には,中国科学院近代物理研究所所長となり,組織 者として中国の原爆開発に関わることになる. (3)王淦昌(Wang Ganchang,1907-98) 1930年にドイツのベルリン大学に留学. チャドウ ィック(1935年ノーベル物理学賞受賞)のもと原子核 研究の1つ,霧箱実験で成果を残し,博士号を取得 した 1934年に帰国.山東大学物理学教授,浙江 大学教授を勤める一方,中国における核兵器開発 などの国防技術開発にも関与した.文化大革命後, 鄧小平に科学研究推進の必要性を提言し, 1986 年以降のハイテク技術推進計画の提唱者の一人と なった.

(4) 銭三強(钱三强, Qian Sanqiang, 1913-92)

清華大学で呉有訓に学んだ後,1937年にフラ ンスへ留学.イレーヌ・ジョリオ・キュリーの 下で核分裂の研究を行った後,内戦中に帰国 (1949年),国民党政権下の清華大学で教鞭をと る.中国建国後には,中国科学院原子エネルギ 一研究所長となり,中国の原爆開発および最初 の科学技術政策となる「12年間長期計画」に関 わった.

(2) 中国最初の「科学技術政策」策定まで

中華人民共和国の成立後,1949年11月には 中国科学院が発足し,物理学者が関わる新技術開 発計画が開始された.その大きなきっかけは,ソビエ ト原爆実験成功(1949年8月29日)および朝鮮戦 争の勃発(1950年6月)であったといえる.

中国が朝鮮戦争に参戦した同年11月以降,アメ リカのトルーマン大統領は中国への原爆使用を考 慮している旨の発言を繰り返すことになる.朝鮮戦 争を巡るこうしたトルーマン発言が,中国首脳部に 大きな危機感をもたらし,中国の核開発の出発点と なったと考えられている.

その第一歩が, 1950 年 5 月 19 日の中国科学 院近代物理研究所の設立である. 同年 10 月 17 日 にこの研究所の所長が銭三強となり, 研究の重点が 原子物理研究とされた. この時点は, 中国指導部 が原爆に強い関心を持ち始めた段階であり, 実際 の開発のための人材, 知識, 資源, 計画, そして意

¹⁾ 山根幸夫「上海自然科学研究所について:対華文化事業の一考察」東京女子大学紀要論集,30(1),1979,pp.1-38. 佐伯修 『上海自然科学研究所 科学者たちの日中戦争』宝嶋社,1995年. 河村豊「大陸科学院設立に関する覚え書き-日本の科学 技術政策の起源を考える」イル・サジアトーレ,No.30,2001,pp.132-139.

²⁾ 中国の科学者についての基本情報は、中国ウェッブサイトである百度百科や Show China, 英語版の Wikipedia などを利用した. 銭三強については、「原子力研究所長 銭三強博士」アジア経済旬報、591,1964 年, p.9 などの雑誌記事も参照した.

³⁾ 杉田弘毅『検証 非核の選択 核の現場を追う』岩波書店, 2005 年 12 月, p.104.

志決定がまだ欠けていた.同じ社会主義体制をとる ソビエトが原子爆弾の開発に成功をすることで,人 材と知識についてはソビエトからの援助が期待でき るものの,建国直後の中国には国防国家建設という 大きな課題があり,原爆開発に資源を投入できるか は不透明という状況にあった.

こうした状況の中で核兵器開発を推進したのは, 国務院総理の周恩来(Zhou Enlai, 1898-1976) であった. 彼は 1952 年 5 月に開催された国防建 設5カ年計画を討議する会議で、「特殊兵器問題」 を討議し、科学者の意見を聞きながらその開発のた めの条件整備を整え始めたという. その後,同 年 10 月にはイギリスが原爆実験に成功,同年 11 月にはアメリカが水爆実験に成功,翌1953年8月 にはソビエトが水爆実験に成功するなど,核軍拡競 争という軍備上の緊張感が増大し、その一方で、ア イゼンハワー政権のダレス国務長官が核兵器による 大量報復論(ニュールック政策)を主張(1954 年 1 月),中国は中国国民党との内戦の継続ともいえる, 金門,馬祖両島への中国からの砲撃を開始(1954 年9月から)するなど,政治的・軍事的な緊張感も増 大した.

この時期中国では, 銭三強ら中国科学院の代表 団がソ連科学院を訪問(1953 年 2 月~ 6 月)し, ソ ビエトとからの軍事技術供与を内容とする「中ソ科学 技術協力協定」を調印(1954 年 10 月), 中国国内 でのウラン資源獲得のための組織を設置(同年 12 月)するなど, 原爆開発のための準備を整えていっ た.

原爆開発を開始するという意志決定が行われた のは、このような軍事的緊張の高まりと、技術的な見 通しとが整った後だった.周恩来は中国共産党中 央書記処拡大会議が開催される前日に、李四光と 銭三強から専門家の判断を聞いた上で,翌日の会 議で中国における原爆開発を決定したという(1955 年1月15日).

この決定を受け,1955年1月30日には「原子 カ平和利用の研究について中国を援助するソ連提 案に関する国務院の決議」が下された.もちろん「原 子力平和利用」には原爆開発も含まれている.ただ し計画案の具体化にはさらに時間がかかり,開発組 織の中心となった国務院第三弁公室(弁公室とは Officeのこと)が「原子力事業の発展に関する計画 大綱草案」を打ち出したのは,その年の12月10日 であった.

そして,原爆開発の方針が決定された後に登場 したのが,中国最初の科学技術政策策定の基礎と なる「科学技術発展 12 年計画」構想であった (1956 年 1 月). この構想は周恩来が中心となっ て作成したものであるという.

4. 中長期科学技術計画と核・ミサイル開発

(1) ミサイル開発計画の登場

核兵器開発を中心とした最初の科学技術政策が 構想される中で,新たに追加された開発計画があ る. それはミサイルト開発であった.

ミサイルの起源は、第二次大戦中にドイツで開発 された攻撃兵器 V2 ロケットである.本格的なミサイ ルは大陸間弾ミサイルのことであり、ロケットエンジン で大気圏に到達し、大気圏外から再突入できる飛 行体のことである.再突入技術が確立されなくてもロ ケットによる人工衛星の打ち上げは可能だともいえ る.戦後は米ソ双方が V2 の技術を導入し、独自に 再突入技術を持ったミサイルを開発した.アメリカで は 1953 年 8 月には中距離弾道ミサイルといえる 「レッドストーン」の試射実験が行われた.

- 1) 平松茂雄『中国の核戦力』勁草書房,1996年10月,p.129. 中国における核開発およびミサイル開発の歴史的経緯は改革 開放政策以前まではその情報が公開されてこなかった.未公開の情報が示されたのは、1986年刊行の『当代中国的航天工 業』中国社会科学出版社,および1987年刊行の『当代中国的核工業』中国社会科学出版社であるという.平松の文献はこの 2冊を利用して書かれた著作である.
- 2) 飯塚央子「中国における核開発-建国から中ソ国防新技術協定締結まで」法学政治学論究 (35), 1997 年 12 月, p.75. この論文も平松の著作と同様に,『当代中国的核工業』(1987 年刊行)を事実確認に使っている.
- 3) 飯塚央子(1997), p.86-87.

4) 平松茂雄,前掲著, p.170. この構想を飯塚は「12年長期計画」草稿と紹介している. 飯塚央子(1997), p.90.

5) 西川純子『アメリカ航空宇宙産業 歴史と現在』日本経済評論社, 2008年8月, p.143.

こうしたミサイル開発競争が始まりつつある最中, アメリカでロケット研究をしていた中国人研究者の銭 学森(钱学森,Qian Xuesen, 1911-2009)が中国 への帰国を果たした(1955年10月28日).

銭学森は、上海交通大学を卒業後、1935年に アメリカに留学. MIT およびカリフォルニア工科大 学に所属し、この間、ミサイル研究者の Theodore von Kármán (1881-1963)のもとで航空工学や空 気動力学を研究し、博士号を取得(1939年). 戦後 は V2 ロケットの開発者であるドイツ人のフォン・ブラ ウン(Werner von Braun, 1912-77)に、専門家と して聞き取り調査を行っている. ソビエト共産主義へ の脅威を背景に 1948年からアメリカで「赤狩り」が 始まったが、銭学森はアメリカでその弾圧を受け、母 国への帰国を切望するようになった. しかし軍事技 術情報を持つ彼を敵対する中国に帰国することを 嫌ったアメリカは、帰国希望を拒否しつづけた. 彼 の帰国が実現したのは、朝鮮戦争におけるアメリカ 軍捕虜との交換によってだった.²⁰

帰国後の 1956 年 2 月に銭学森は,「わが国国 防航空工業の建設に関する意見書」を国務院に提 出した. 銭学森と面談した周恩来は,原爆開発に加 えて,ミサイル開発も中国の国防建設と科学技術発 展にとって,戦略的意義があると判断し,ミサイル開 発計画を準備することになる.³⁰ こうして,ミサイル 開発のための最初の組織,「国防部第5研究院」(院 長:銭学森)が設立された(1956 年 10 月 18 日).⁴⁰

(2) 科学技術発展遠景規画(1956-67)

さて、周恩来による「科学技術発展12年計画」 構想を受け、国務院に科学計画委員会(中国語で 科学規画委員会)が設立されたのは、1956年3月 であった.委員長(中国語では主任)には人民解放 軍創設者の一人であり国務院副総理の陳毅(Chen Yi, 1901-72),副委員長(中国語では副主任)には 副首相で国家計画委員会主任の李富春(Li Fuchun, 1900-75)および、国務院副総理の薄一波 (Bo Yibo, 1908-2007)が着任.同時に知識人の 代表として、科学院院長の郭沫若(Guo Moruo, 1892-1978),同副院長の李四光(前出)が着任し た.つまり当時の中国、政治指導の中心である 国務院と、科学者グループの中心である科学院 から選ばれた人物によって、科学技術政策を策 定する組織が構成されたことになる.

委員会発足後,原爆開発に加え,新たにミサ イル開発もこの委員会で検討し,周恩来が提案 した「科学技術発展12年計画」構想は,「科学技 術中長期計画(中国語では科学技術発展遠景規 画)」として公布された(1956 年 12 月).この 計画案が,中国最初の科学技術政策および計画 案と評価できる(以下「12カ年計画」と呼ぶ).

この計画では、12年間で先進国の科学水準に 中国が追いつくことを目指すとされ、13領域、57 項目の研究テーマと、12項目の重点課題が設定 されたらしい.この内12項目の重点課題には、 (イ)原子力の平和利用、(ロ)ジェット技術の開発、 (ハ)半導体・コンピュータの開発、(ニ)生産の自

- 経歴については、銭学森(山田慶児訳)『技術科学論』法律文化社、1967 年 7 月、の解説部分、および Wikipedia 「Qian Xuesen」の項目を参照した. 2008 年に下村修(アメリカ市民権取得)、マーティン・チャルフィー(米)とともにノーベル化学賞 を受賞した銭永健(Roger Yonchien Tsien, 1952-, アメリカ市民権取得)は、銭学森の従兄弟である.
- 2) アメリカにおいて銭学森と一緒にロケット研究を行った人物に, 銭偉長(钱伟长,Qian Weichang, 1912-2010)がいる. 彼は建 国前の 1946 年に中国に帰国し, 中国のミサイル開発に携わったという. 原爆開発に関わった銭三強, ミサイル開発に関わった 銭学森, 銭偉長の3人は, 中国科学界の泰斗の「三銭」とも呼ばれている.「三銭」については, 以下の Web を参照した. http://jp.showchina.org/02/60/
- 3) 原爆開発計画を担当していた聶栄臻(Nie Rongzhen, 1925-87)は、中央軍事委員会拡大会議において「ミサイル研究活動を打ち建てる初歩的意見」を提出(1956年5月)、これが中国におけるミサイル開発計画の出発点となった. 聶は、1958年より国防科学技術委員会主任、国家科学技術委員会主任を兼任するなど、中国の科学技術政策実施担当者(国務院副総理)として活動した軍人である. 平松茂雄、前掲、p.170.
- 4) 銭学森が院長となったが、彼が中国に帰国した動機がアメリカにおけるマッカーシズムへの恨みであること、一方、中国では技術的な水準が低いために銭の提案を支持する勢力が少ないことから、中国の宇宙開発プログラムを主導することはなかったという評価もある。鈴木一人『宇宙開発と国際政治』岩波書店、2011年3月、p.129.

動化,精密機器の開発,(ホ)石油など重要資源 の探査,(へ)合金系統,新冶金技術の開発,(ト) 重要資源の総合開発,(チ)新型動力機械の開発, (リ)長江・黄河の総合開発,(ヌ)農業機械化・化 学肥料,(ル)予防医学,(ヲ)基礎理論研究,など の課題が含まれていることが分かっている.

ただしこの計画には、「武器装備発展計画」も 含まれているはずなので、(イ)は原爆開発、(ロ) はミサイル開発と読み替えることができる.

「12 カ年計画」の進行中に、中国を訪問した日本人物理学者たちがいる.彼らは、「科学者の個人的経済的生活はかなりゆとりがあると聞く」、「指導的物理学者たちはもちろん、研究意欲が旺盛」で、「研究のための費用は、(中略)日本における同方面よりも惜しみなく多額に用意されている」など、計画が順調に推移している様子を報告している.

しかし、1958 年から毛沢東主席(Mao Zedong, 1893-1976)が推進した「反右派運動」や「大躍進 運動」も重なり、1956 年に始まった「12カ年計 画」は開始 2 年目で中断を迫られた.⁴⁰ その 中でも継続されたのが、ミサイル開発計画と原 爆開発計画であった.

(3) ミサイル開発の進展

ミサイル開発の進展の決め手は、ソビエトからの 技術援助にあった.まず 1957 年 10 月 4 日にソビ エトがアメリカよりも早く人工衛星(スプートニク1号) の打ち上げに成功したことは、毛沢東に強い刺激を 与えたといわれている.ソビエトとの新技術協定が締 結(1957 年 10 月 15 日)された後、毛沢東は、中国 共産党第八回全国代表大会第 2 回会議で、「われ われは人工衛星を作らなければならない」と発言 (1958 年 5 月 17 日). また中央軍事委員会拡大会 議では、「原爆をもたないと人から認められないとい う. それならば、われわれは手に入れよう. 原爆、ミ サイル、ICBM をつくるには、十年あれば可能であ ると思う」と述べたという(同年 6 月 21 日).

これを受け、中国では、科学院に人工衛星光学 観測弁公室が設置され、軍内部に国防科学技術委 員会(委員長:聶栄臻,Nie Rongzhen,1925-87)が 発足した(1958年10月).国防部第5研究院はこの 軍部統制下の委員会の指導受ける形で開発体制を 継続できた.ただし、当初のミサイル開発は、ソビエ トの技術情報に依拠した、近距離地対地ミサイル P2の模倣品開発であった.

開発プロジェクトである指導小組(組長は銭学森, 小組は group のこと)の下,第1設計院(人工衛星, 運搬ロケット本体の設計,第2設計院(中国科学院 自動化研究所:制御システムの研究設計),第3設 計院(中国科学院物理研究所:衛星探査器,空間 物理学研究)が開発を担当,初の近距離ミサイル 「東風1号」(DF1)の打ち上げに成功した(1960年 11月5日).模倣から自主設計に転じた4年後に は,中距離ミサイルの発射実験に成功(1964年6 月29日)したが,人工衛星の打ち上げに成功した のは,1970年4月24日であった(人工衛星「東方 紅」).

(4) 原爆開発の遅れ

中国が初の原爆実験を行うのは、1964 年 10 月 16 日であった. 周恩来が特殊兵器問題として構想 してから約 12 年を要した. 遅れた理由は、中国とソ

1) 毛里和子「科学技術と中国外交」国際政治, Vol. 1986, No. 83, 1986, pp. 91-106, p. 92.

- 2) 中国総合研究センター(Science Portal China)による Web 資料「過去の科学技術中長期計画」参照.
- 3) 有山兼孝・広根徳太郎「訪中物理学代表団報告(物性の部)」物性論研究, Vol. 2 (1957) No. 3 pp.437-449. この報告には, 1957 年 5 月に北京, 南京, 上海, 杭州の大学, 科学院所属の研究所を訪問した際の記録と評価が書かれている.
- 4) 楊沛霆, 張中梁, 張晶「最近 40 年間の中国の科学技術:日本の科学技術政策研究に期待するもの」年次学術大会講 演要旨集 3, pp.72-76, 1988年10月.この報告において, 中国の科学技術発展では, 第一停滞期(1960年から1961年) があり, 1959年から1962までは論文数が減少した.その理由として楊らは,「反右派運動」の深刻化(1957年),「大躍進 運動」(1958年)があると指摘している.一方で, 柯雁(前掲, p. 12)では, この「12カ年計画」が繰り上げ達成され, 次の計 画が1963年から「10カ年計画」として始まったと書いてある.しかしこの「繰り上げ達成」という評価の裏付けは示されていない.
- 5) 飯塚央子「米中ソ関係と中国の核開発-中ソ国防新技術協定締結からソ連専門家引き揚げまで」法学政治学論究 (39), 55-86, 1998 年 12 月, p.73.

連との政治的な対立から、ソビエトによる技術援助 が中断(1957年6月20日)および「国防新技術協 定」が破棄(1959年6月20日)され、ソビエ トの核技術導入と技術者の援助が期待できなく なり、自主開発をしなければならなかったこと がある.また国内では、党内の綱紀粛正を目的 とした「整風運動」(1957年)、「反右派運動」(1958 年)、さら先進国の技術に短期間に追いつくため に毛沢東が導入した「大躍進運動」(1958年から 62年)などにより、研究活動全般に大きな停滞を招 いたことなども指摘できよう.¹⁾

ソビエトからの技術援助の中断に対しては、「独 立自主」を強化する政策を展開し、開発組織であっ た第二機械工業部を改編し、核工業部門を重点化 することで対応した.また、大躍進運動による停滞に ついては毛沢東が自己批判を行なったこと(1962年 1月)を受け、1963年ころには立て直しの機運が訪 れた.

5. 文化大革命期の原爆実験と科学技術政策

(1) 原爆実験への過程

困難の中で原爆開発を軌道に乗せたのは,周恩 来であったという.彼は 1961 年 2 月までには,「国 防先端技術を3年から5年で難関を突破する」との 方針を建て,聶栄臻が作成した「科学研究工作+ 四条」を中国共産党に提出させ,原爆開発計画を 政治的混乱から救い出した.原爆開発に必要な研 究部門と,核物質の抽出のための濃縮部門は,次 のように進められていた.

まず,研究部門では,原爆開発を担当した第二 機械工業部が,「北京核兵器研究所」を設置(1958 年7月).副所長には王淦昌(前掲),郭永懐(郭永 怀,Yung-huai Kuo, 1909-68),彰桓武(彭桓武, Peng Huanwu, 1915-2007)ら,欧米での留学経 験のある物理学者 3 人を配置した. 郭永懐は,カナ ダのトロント大学に留学,アメリカのカリフォルニアエ 科大学,コーネル大学の勤務を経て, 1956 年に帰 国.中国では,中国科学院力学研究所に所属. 彰 桓武は,イギリスのエディンバラ大学で原子核物理 学を学び, 1947 年に帰国し,清華大学に所属して いた.

一方,実際の原爆設計等で貢献した科学者に は,当時 35 歳前後の若手研究者として,鄧稼先, 黄祖治,于敏,周光召らがおり,彼らが原爆の基本 原理,爆発過程の計算,関連技術の把握を行なうな ど,ソビエトの援助を受けずに核兵器開発を行うた めの実質的な貢献を行ったとされる.

一方,濃縮部門では、1957年9月には蘭州市
郊外にウラン濃縮工場の建設が始まり、原子炉によるプルトニウム抽出方式は行わず、天然ウランからのウラン 235を抽出する方式のみを実施した.
1961年末にはガス拡散法でウラン 235を抽出する
工場(ウラン濃縮工場)が稼働を開始したという.

研究部門および濃縮部門の進展を受け,「国防 先端五人小組」(1961 年4月)が結成され,第二機 械工業部からは「1964 年に原爆実験を実現させる 構想」が提出された(同年5月).

1962 年 10 月に発生した核兵器配置を巡るキュ ーバ危機の後,毛沢東は中国の原爆実験プログラ ムである「二年計画」を発動させた(同年 11 月 3 日).中国の原爆開発計画の暗号名は「五九六」と いう.これは,1959 年 6 月にソビエトが「国防新技 術協定」を破棄した時期を意味している.ソビ エトの援助なしでも完成させるという意気込み を込めた名称ともいえる.

ソビエトの援助がなくなってからどのようなプロセ

¹⁾ 核開発担当の銭三強は、この運動に呼応してミサイル開発担当の銭偉長を批判したため、銭偉長はすべての職務を剥奪され る事態に至ったという. 飯塚央子(1997), p.93.

²⁾ 鄧稼先(邓稼先, Deng Jiaxian, 1924-86)は、1948年にパーデュー大学に留学、1950年帰国. 原爆開発開始とともに名前を長く伏せられた科学者であった. 1986年6月, 鄧小平により国防科学技術工業委員会副主任に任命されることで、始めて中国国内でその存在を知られるようになった. 中国で行われた核実験の内、15回を指揮したという.「中国の「原水爆の父」一鄧稼先」北京週報、1986-7-8 Web版.「原子力専門家一鄧稼先氏」北京週報、1986年8月Web版. 2009年には映画『鄧稼先』も制作されている. 黄祖治(Huang Zu-Qia, 1924-)は、清華大学卒の物理学者. 于敏(Yu Min, 1926-)は、北京大学卒の物理学者で「水爆開発の父」とも呼ばれている. 周光召(Zhou Guangzhao, 1929-)は、1951年清華大学卒の物理学者. 1961年には第二機械工業部第九研究院理論研究所副所長にあった.

スでウラン235の抽出に成功したのか、またソビエト やアメリカの核技術情報をどこまで入手していたの かなどについては、現在も詳細は明らかにされてい ない、中国で刊行された『当代中国的核工業』 (1987 年刊行)では、開発担当者として鄧稼先など が高く評価されているようである.

こうして中国最初の原子爆弾(ウラン型)の実験が 行われた(1964年10月16日).また,およそ3年 後には,中国初の水爆実験を行うまでに核技術を 進展させた(1967年6月17日).

(2)「科学技術計画綱要」の策定

原爆開発の最終段階にあった 1963 年頃には, 停滞していた科学技術研究全般について見直しが 行われた.

「12 カ年計画」すなわち「科学技術発展遠景規 画(1956-67)」は、中国の最初の科学計画であった が、開始早々の1958年には停滞を余儀なくされて いたこと、大躍進運動による停滞を毛沢東が自己批 判したことなどから、1963年には新たな科学技術 政策構築の動きが出てきたことは、すでに述べた. その新しい動きが、「科学技術発展規画(1963-72)」 の策定である.今回は、「1960年代の先進国の科 学技術レベルに追いつく」という総目標を設定して いたという.³⁰また、この計画期間が10年間であ ることから、前回の「12カ年計画」に対して今回は 「10カ年計画」とも略称された.⁴⁰

この計画策定の背景には周恩来によって提起された工業,農業,国防,科学技術の現代化,すなわち「四つの現代化」(1964年)が関わっているようである.この提起には中国国内の科学技術計画立案だけでなく,国外に対しても,反アメリカ,反ソビエト

の立場から科学者を組織し,その主導権を中国が 確保するという方針も含まれており、その代表事例 が, 1964 年 8 月に北京で開催された「北京シンポ ジウム」といえる、オーストラリア、キューバ、インドネ シア,ケニア,北朝鮮,メキシコ,パキスタン,ベトナ ム, そして日本など, 合計 22 カ国がこのシンポジウ ムに参加している.参加国を眺めると,アメリカを中 心とした西欧諸国,またソビエトを中心とした東欧諸 国からの参加はない.日本を含む,東アジア,東南 アジアを中心とした諸国および中国の友好国に限 定されていた. アメリカにもソビエトにも組しな い,新たな国際連携を構築する意図があったのかも しれない.しかしこの活動は文化大革命の動乱の 中で立ち消えとなり、1968年に開催が予定され ていた第2回北京シンポジウムは実施されること は無かった.

一方この時期には、中国の国家計画の中心と なっている五カ年計画にも奇妙な空白が発生し ている.第2次五カ年計画は1958年から1962 年までの期間で終了したが、第3次五カ年計画は4 年の空白の後、1966年から実施されている(1966 ~1970年).空白が生まれた背景には大躍進運 動の存在があるが、直接的には、第3次五カ年計 画立案の過程で、何らかの政治的な対立があったこ とが知られている.一つの案は国家計画委員会が 提出している.1964年5月の中央工作会議で検 討され、原則的に採択された「第3次五カ年計画 (1966-70年)の初歩的構想」(報告の要旨)であ る.いま一つは1965年9月に、国家計画委員会が 起草し、中央の検討を経て、基本的に認可された 「第3次五カ年計画の配置状況に関する報告要

- 1) 飯塚央子「中国における核開発-「向ソー辺倒」から米中接近へ(特集 中国共産党の八十年)」中国,2114,2002-10, pp.85-108,p.97. 平松茂雄,前掲, p.157.
- 2) 平松茂雄, 前掲, p.168. 中国の水爆実験は, フランスより1年早かった. どのように水爆開発が行われたのかの資料を著者 は発見できていない.
- 3) 毛里和子, 前揭, p.92.
- 4) Science Portal Chaina の「科学技術政策概要」を参照した.また、柯雁(張毓英ほか訳)『中国基本情況シリーズ 中国の科学技術-改革と発展』 五洲伝播出版社,2004 年 11 月,166p. p.12 を利用.なお、この文献は、電子版を無料で入手できる. http://219.238.219.74:81/j-zgjbqk/html/zgkj/book.pdf.残念ながら、今回、この「10 年計画」の内容を知る資料を探し出すことができなかった.
- 5) 安藤彦太郎「北京科学シンポジウムについて」中国研究月報 (383), 21-26, 1980-01-25. その他「(資料) 1964 年北京科学 シンポジウム準備会議コミュニケについて」などの資料もある.

綱」である.

前者の計画は「戦争に備え,自然災害に備え,人 民の利益を図る」というように,国防の建設を第一に 置いていることが特徴である.一方後者は,農業, 軽工業,重工業を重視する計画を特徴としている.

しかしこの第3次五カ年計画も、文化大革命の影響で計画通りには進められなかった.

(3) 10年間の衰退(1966-76)

大躍進政策に関して毛沢東が自己批判したが, そのため毛沢東の権力が低下した.それを取り 戻すために毛沢東が行った権力奪取のための闘 争が,文化大革命であると言われている.ここ では,科学技術政策に与えた文化大革命の影響 だけを確認しておきたい.

財政面での減少を,研究費の断片的な推移で見ても, 1966 年時点での落ち込みが大きいことが確認できる(表 2).

表 2 中国での研究費の推移

1949 +	9600 万元
1960年	38億8100万元
1966年	25億元
1978 年	52億8900万元

また,この時期には科学者の多くが農村地域での 労働に追いやれ,中国の核兵器開発の中心を担っ てきた銭三強も「下放」の対象となった.

文化大革命が与えた科学技術発展への影響は 中国側の立場からでも,現在,次のように説明され ている.「1966年から中国は10年続いた「文化大 革命」の災難に見舞われた.この政治運動は中国 の科学技術事業にとって疑いもなく大きな災難であ った.その期間に,科学技術管理はマヒ状態に陥 り,研究機構は解体され,広範な科学技術要員は 科学研究の仕事を停止させられ,農村か工場・鉱山 に行って働かされた.中国の科学技術はほとんど停 止して前進しなかった」.²⁰

また,文化大革命終了時の工業レベルについて,鉄鋼工業の産品中,50から60年代レベルの

ものが生産能力の 70%, 30 から 40 年代のものが 15%,世界の 70 年代レベルに達しているのは全体 の 15%に過ぎなかったといい,生産技術が老朽化 していたことが分かる.また「核兵器や軍事先端部 分を除いて,工業技術の決定的後れ,科学技術人 材の深刻な不足がもたらされた」.「中国の科学技術 にとって致命的だった」.結果として,「中国の技術 レベルは,先進国に 30 年後れている」状況になっ てしまったとの評価もある.

文化大革命に終止符が打たれたのは,周恩来の 病死(1976年1月8日),毛沢東の病死(同年9 月9日),および文革推進派の「四人組」の逮 捕(同年10月6日)を経てのことだった.

6. 小括

本論考では、日中戦争後から文化大革命までの 約 30 年間の中国における科学技術政策の歴史的 経過を概観してきた.文化大革命後から現代までに は、さらに 30 年間の歴史的な経過があるが、その 部分は別の論考で扱うことにし、ここでは、最初の 30 年間における中国の科学技術政策に現れた特 徴について、「危機感」と「二面性」というキーワード を手がかりにして小括として、まとめてみたい。

ただし、本論考で利用した資料は日本語による 2 次文献に限定されており、しかも網羅的ではない. また中国語資料は断片的に眺めたに過ぎない.加 えて、この時期の科学技術政策に関わる事実関係 はまだ多くが不明の状況にあり、資料公開も進んで いないようである.こうした限界があることを承知で、 ここでは今後の研究の進展を考えた考察とする.

(1) 対外的危機の存在が開発を進めた

先ず,この時期の「危機感」と科学技術政策との 関わりを考えてみる.第1の危機感は,冷戦期にあ って西側と東側との軍事的緊張に加えて,朝鮮戦 争におけるアメリカとの直接的な軍事的対立であり, これが核兵器取得を中国に決断させる切っ掛けとな った.当初はソビエトからの技術援助により核兵器を 開発する予定であったがそのようには進まなかっ た.それが第2の危機感とつながる.同じ社会主義

^{1) 『}中国 2005』新星出版社出版(日本語版), 2005年, 217p.

²⁾ 柯雁, 前揭, p.13~14.

³⁾ 毛里和子, 前揭, p.93.

国であるソビエトとの路線対立および軍事的対立が 顕在化する、アメリカやソビエトから受けた危機感 は、核兵器を撃ち込まれるという差し迫った軍事的 脅威となって現れ、それゆえ、核兵器および運搬手 段としてのミサイルの独自開発が,中国の科学技術 政策の最優先項目となる. 軍事技術開発を科学技 術政策の重点においたのは,中国だけではなく,ア メリカもソビエトも同様であった.ただし、中国側から の視点で見ると、単純な東西冷戦ではない. つまり 西側陣営との対立に加えて,中国の独自路線の堅 持による東側陣営との対立を招き,技術大国であっ たアメリカ,ソビエト双方からの孤立を招いた.こうし た孤立は,科学技術上での危機感を一層と増大さ せる要因となっていたといえるだろう. そして, 対外 的な危機感を踏まえた中国内での軍備政策,科学 技術政策により,中国は短期間にミサイルの独自開 発,核兵器の独自開発に成功し、この分野において は、当時の世界の先端に並ぶ水準に到達したこと になる.

しかしその一方で,基礎研究や工業技術に関わる科学技術全般においては,順調には進まず, 1970年末時点では,先進国に比べて 30年もの遅れを招いた.このような先端性と後進性とを併せ持つ特徴は,現代の中国においても見いだされる「二面性」と関連づけることができるのではないだろうか.

(2) 毛沢東による政治闘争が開発を妨害した

先端性を進めた要因が対外的な危機感にあった とすると、後進性を招いた要因は国内における政治 闘争、右派と左派との権力闘争にあったといえる. 確かに、軍事技術開発を優先としたことによる資源 配分の問題も存在していたと思われる.だがそれ以 上に、毛沢東の経済政策上の失敗、権力基盤の弱 体化、政治権力の確保のための対立者の追い落と しなどの動きが、科学技術政策の実施を大きく妨げ る結果につながっている.

毛沢東が科学技術政策の実施を妨害したとする ならば,科学技術政策を策定し,実施に努力した人 物は誰であろう. 今回の調査から断片的見えてきた 人物は周恩来である. だが毛沢東と周恩来との関係 を評価することは簡単ではない. 周恩来は毛沢東と の対立を避けつつ, 中国の経済発展, 科学技術発 展を進めていた. それゆえ, 大躍進運動や文化大 革命も支持し, 周恩来の路線を進めようとした鄧小 平らの失脚も黙認する一方で, 各種の経済政策を 立案・推進し, 四人組との対立の中で鄧小平らの復 帰に努力していたと, 今日では評価されている.

毛沢東は中国の統一を維持のために大きな精神 的な支柱になったが、その一方で、毛沢東が企画し た大躍進運動や文化大革命が、中国の経済発展、 科学技術発展には否定的な影響を強く持った.そ の中で、毛沢東と正面からの対立を避けた周恩来 が、実務的な仕事を着実に行うことで、先端技術を 手にすることができたという判断である.確かに、当 時の中国での技術開発においては、軍事技術が優 先され、生産技術が軽視される状況にあったが、科 学技術政策が機能しない要因を見る限り、軍事優 先というだけでは理解ができないと思われる.それ ゆえこの時期における科学技術面での「二面性」 は、毛沢東を中心とした権力闘争、背景にあった右 派と左派の対立の存在が大きな要因となっていたと 推測した.

(3)残る課題

ただし,周恩来を科学技術政策策定の中心人物 と評価することが正しいかどうか,つまり 1987 年に 刊行された『当代中国的核工業』に描かれた周恩来 像がどこまで根拠に裏づけられているかどうか,さら にまた,右派勢力が科学推進派であり,左派勢力が 軍事優先派であったと評価してよいかどうか,こうし た点は,まだ検討の予知があり,今後の実証的な調 査が必要である.さらにそもそも,中国に現れている 「二面性」を権力闘争,右派勢力と左派勢力との対 立という概念で説明できるのかも大きな疑問である.

これらの疑問は,改革開放政策後の中国におい てどのような科学技術政策が進展したかを調査する 中で,別の論考で検討することとしたい.

(平成24年1月6日 受理)

1)「家族と側近が語る周恩来」全4回, NHK BS プレミアム, 2011年8月放映. 第三章「決意~窮地の外交」, 最終章「犠牲 ~命尽きるまで」参照.

福島第一原発事故と技術者の美徳

川北晃司*

Fukushima Daiichi Nuclear Accidents and Virtues of Engineers

Koji KAWAKITA

Fukushima Daiichi Nuclear Accidents will let us consider much about indispensable ethics and virtues for engineers and citizens in general. Some writings including those by professional engineers, scientists, and others are in order. Especially, late Hal W. Lewis, a famous American physicist, who wrote the book "Technological Risk" in 1990, should be correctly evaluated and duly honored in his anti-complacency virtue-orientation.

Keywords : Fukushima Daiichi, Risk, James Lovelock, Harold W. Lewis, Engineering Ethics

はじめに

福島第一原発事故は日本人にとって身近なだけ に,技術者倫理授業のなかで,これまで技術者倫 理教科書で紹介されてきたスリーマイルやチェル ノブイリでの原発事故より,はるかに重い事例と して扱われるのが自然である.たんに身近という だけでなく,技術者に必要な倫理や美徳という点 で,否,市民全員に必要なそれらについて,多く のことを考えさせてくれるだろう.この事故につ いて考えるために,内容的に偏らない文献調査を 心がけた.本稿の後半では,リスク論の分野で有 名なルイス著『科学技術のリスク』(1990年)を, 原書と邦訳書を比較対照することで,いっそう高 く評価可能との結論に達した.

1. 3.11後の諸議論から

1-1 ドイツ倫理委員会での脱原発議論

原発はどこまで安全,必要か.それは技術や経済の問題ではあっても、一見、倫理問題のようには見えない.労働者の生活手段としての原発について、1990年時点の日本で次のような指摘があった.すなわち、原発は自動車産業ほど巨大ではな

いにしても、すでにある程度すそ野の広い産業構 造を形成しており、原発の関連企業やそこで働く 多くの人間にとっては、原発は電気のためにある というより、いまや生きる手段そのものになりつ つある¹⁾.

また、福島第一原発事故後に書かれた文章にお いて、ある日本人技術者は、原子力技術を早急に 建て直して世界の手本に、との趣旨のもと以下の ように力説している.すなわち,太陽電池が国民の 活動(経済・時間)に合わせて供給できるエネル ギー源でないことを多くの国民は知っている.専 門家が自陣利益(自分野への資金流入)に走るの を怖れる.安易な再生可能エネルギー政策は一時 的に国民の気を逸らすのみである.原子力は厄介 であるが人類にとって利用しないで済むエネルギ 一源ではない.エネルギー安全保障では「供給力」 と「量」を考えねばならない.そして、あらゆる 事態に備え、核種閉じこめのために冷却可能な原 子炉技術でなければならない.それは十分可能で ある²⁾.

それではなぜ、たとえばドイツの倫理委員会で は脱原発が議論されたのか. 2011 年にドイツ政府 に 脱 原 発 を 進 言 し た 倫 理 委 員 会 (Ethics Commission on a Safe Energy Supply)の共同議
長を務めたドイツ元環境相,在ポツダムの持続可 能性高等研究所(Institute for Advanced Sustainability Studies)所長であるクラウス・テ プファー(Klaus Töpfer)氏によれば,どのエネル ギーを使うかの判断は社会の様々な要因に関係し, 原子力利用は次世代への責任の問題,われわれの 世代には見えていない隠れたコストの問題につい ても考えることが必要だからである.次世代の健 康リスクがより小さい技術を得る機会があるのな ら,リスクが高い技術を避けるのは倫理的な要請 である.代替案があるならそちらを採るべきだし, 需要を減らして対応できるならそうすべきだから, というのである.

この倫理委員会で議論された倫理的論点は、5 つあった. 第1に脱原発が社会対立を生まないよ うにできるか. 電気料金が上がって貧しい人が電 気を使えなくなってはいけない. 第2は脱原発が ドイツの輸出、産業競争力を損なわずに実行でき るか. 第3に温暖化ガスの排出を増やさずに脱原 発ができるか. 第4に脱原発によってドイツが電 力の輸入国になってはいけない. ドイツは電力の 純輸出国だが、輸入国になって原子力による電気 を買うのではいけない. 第5に電力網を不安定に することなく脱原発ができるか. 停電は市民生活 ばかりか, 産業界への影響が深刻であり避けねば ならない.これらの5点を考慮した上で、倫理委 員会は脱原発を勧告したが、この勧告の実施はむ ろん容易なことではない、「脱原発はアポロ計画の ような挑戦だ」とテプファー氏は語っている³⁾.

太陽光や風力といった自然エネルギーをただち に原子力の代替エネルギーとするのは,現実的に 難しい.そこで,国際エネルギー機関(IEA)は 2011年6月6日,世界が「ガス黄金時代(a Golden Age of Gas)」を迎えたとするリポートを発表した. それによると,世界の天然ガス需要は2035年に08 年比で62%増加すると予測される.「過渡的なエ ネルギーとして天然ガスに頼らざるをえない」と いうのが,環境派も含めてエネルギー関係者の間 では,共通した見方となっている⁴⁾.

1-2 ラブロック氏の原発擁護論と科学者観

しかし、ガイア理論で有名な英国の科学者ジェ ームズ・ラブロック(James Lovelock)氏は、すで に 2005 年に日本原子力学会のインタビューに答 えて,次のような懸念を表明していた.すなわち, 石炭を燃やすことで発生する二酸化炭素量は,ガ スを燃やすことで半分になるというのは、学校で 習う単純な化学でしかない.実はガスを燃やす場 合,生産地点からこれを燃やす家庭までのパイプ ラインで、4%のガスが漏れる.それだけで,石 炭燃料と同じくらい悪い状況をもたらす.という のは、メタンは、二酸化炭素より25倍も強い地 球温暖化ガスだからである.したがって、石炭と ガスを比べるときには、この漏れ出す分を考慮し なければならない.業界の方から聞いた話として、 この漏出は全く避けることができない.この点を 考えると、ガスの利点はない、というのがラブロ ック氏の見解である⁵⁾.

それでは、もし地震や津波のような天災がなく、 テロのような人災もなく、最新のマニュアル通り に操作されているならば、原発は安全か. 2011 年3月15日の英ガーディアン紙電子版で、ラブ ロック氏は原発の安全性について次のように語っ ている⁶⁾.

The climate scientist James Lovelock said the problems in Japan should not put people off nuclear power. "There is a monstrous myth about nuclear power. I would make a strong guess that of the tens of thousands of people killed in Japan, none of them will be from nuclear power." He said that people were "prejudiced" against nuclear power unreasonably. "It is very safe," he said. Chernobyl, for instance, was "an idiotic mess-up that could only have occurred in the Soviet Union", and according to UN estimates had killed only about 56 people. More people are routinely killed in oil refineries and coal mines, he pointed out. He added that the reactors affected in Japan were among the oldest still operating, and that newer plants had more safety features.

しかし、ラブロック氏が原子力を擁護するのは、 技術者倫理が最大の主眼とするところの、人類の 健康・福利のためというより、地球(ガイア)の ためであることを忘れてはならない、と言いたい、 「惑星的観点から原子力を考える」というタイト ルで、彼は1993年に次のように証言しているか らである.彼は、原子力エネルギーは化石燃料を 燃やすのに較べれば地球に及ぼす害は遙かに少な い、と考えているわけであるが、

私 (ラブロック氏) は, どんな集団にも属さな い科学者として話してきた. (中略)しかし, 私 の仲間達は,現在空席になっているある組合 の代表の仕事をやれと私に押しつけてきた. 組合員は全員人間以外の生きもので,バクテ リアだとか,虫だとか,いささか見かけはぱ っとしない仲間ばかりである. この仕事は断 るわけにはいかないだろう. 人間の代弁者は たくさんいるが,彼らの地球が生きていく上 で,人間よりもずっと頼りにしている彼らの 代表として意見を言う人間は滅多にいない からだ⁷⁾.

彼のこの「脱ー人間中心主義」の視点は貴重で ある.しかし,地球温暖化やそれに伴う乾燥化が 死活問題となる,多くのバクテリアや虫たちの組 合利益代表者を自認する彼の思想は,バクテリア や虫ならぬ人類にとっては,むしろ「危険」な思 想にも近づき得る.したがって,もし原子力コミ ュニティとその周辺が彼の原子力擁護論を安易に 援用するとしたら,それは安全・賢明とは言い難 い,というのが私の主張である.

むしろ, ラブロック氏の次のような冷静な観察 と自省の普及こそは,われわれと原発をその「安 全神話」の重荷から解き放ち,その結果,むしろ 「人類の安全」に寄与するはずのものと考えたい. 彼は言う⁸⁾.

科学者だって人の子である.(中略)実施義務の ない事柄に自ら責任を負おうとするのも難 しいことである.(中略)科学者としてアドバイ スをする者も,自分では客観的になっている つもりだろうが,やはり自分の属する科学者 集団の欲求なり偏見なりに左右される.

1-3 安全は危険,危険は安全

ラブロック氏らはその確率を低く見積もるかも しれないが、地震その他の原因によって原発が実 際に過酷事故を起こした場合、被災者の数は100 万~1000万人単位に及びうる.その被害の甚大さ は、列車事故や飛行機事故とは比較にならぬ規模 の、「破局」という言葉がふさわしい.われわれは 喫煙や自動車事故のリスクはたぶん納得づくで受 け入れているが,原発事故による「破局」的事態 だけは「想定外」でないと,そもそも原発を受け 入れられないはずである.

今回の福島原発の場合,東北地方と首都圏全体 が長期にわたって人間の住めないとされる環境と ならずに済んだのは, 僥倖と,事故現場の人たち の献身的な危険作業の成果であろう.その人たち は複数の原子炉が同時に全電源喪失するという世 界初の困難な状況の中で,文字通り命がけで格納 容器ベントなどの対処を遂行してきた.しかし, そのような英雄的行為の発動が必要とされたこと 自体が,すでに不適切な「失敗」事例なのである.

東京電力福島第1原発事故の対応を指揮した, 陸上自衛隊中央即応集団の宮島俊信・前司令官は, 深刻さを増す原発,見えない放射線の恐怖の中で, 最悪の事態を想定している.避難区域を原発から 100~200キロに広げるシミュレーションを重ね, 状況によっては関東も汚染されるので「日本は終 わりかと考えたこともあった」と緊迫した状況を 明かしている.中央即応集団(CRF: Central Readiness Force)とは,テロや国際貢献活動に 迅速に対応するため,2007年3月に編成された日 本の防衛相直轄組織である.核・生物・化学兵器 対処専門の「中央特殊武器防護隊」など専門性の 高い部隊を持ち,原発事故に際し,自衛隊では同 防護隊が中心に活動したのであった⁹⁾.

したがって、東電福島原発事故調査・検証委員 会委員長、畑村洋太郎氏の表現を借りるならば、 原発を続けるならば、まず、最初に「悪意の鬼」 になり、徹底的にどうなったら危ないかというこ とをあぶり出すことから始めなくてはならない. 「自分がテロリストになったつもりで、自分が原 発事故を起こすならどこを狙うかというシミュレ ーションを徹底的に行う.その結果、なおかつ危 ない芽はつぶせると、自信をもって言い切れるの であれば、ようやく社会から、少しは認められる 運用ができる」と畑村氏は言うのである¹⁰⁾.

原子力は、安全だという人が実施すると危険だ が、危険だという人がやると、かろうじて安全と いうことだ、という故・武谷三男氏(物理学者) の所見¹¹⁾に通じるものがあるだろう.

1-4 形式主義と無謬主義

既存の原発の運転を継続するためには、最高レ

ベルの安全対策を実施することが必要だという意 見は、国内外で共通したものになりつつある.最 高レベルの安全対策には、事故を未然に防ぐ対策 と、事故が起きた場合の拡大防止対策がある.非 常用ディーゼルのある部屋に海水が侵入しないよ うに気密(水密)性を高めたり、配管のサポート を強化したりすることは前者になる.一方、外部 に蒸気を逃がすベント配管の途中にフィルターを つけたり、電源車を高台に準備したりするのは後 者の対策になる¹²⁾.

しかし、全体としての「原子力発電所(nuclear power plants)の安全」を、日本が米国から導入し 改良を重ねてきた軽水炉(LWR:Light-Water Reactor)という, 部分的な「原子炉(a nuclear reactor)の安全」と等値することで得られたかの ような原子力安全神話(the safety myth of nuclear power plants)が、事故時の対策を不十分 なものにしたとしても不思議ではない. 福島第一 原発の事故は、自然災害に起因する「周辺事故」 (柳田邦男氏は「辺縁事故」と名づけている) と いう点では、柏崎刈羽原発で経験したのとまった く同じである、と畑村洋太郎氏は述べている.事 故は原子炉本体ではなく、その周辺で起こった. 使用済み核燃料の保管プールで起こっている深刻 な問題も原子炉本体ではなく周辺のものである. 柏崎刈羽原発で周辺事故を経験しているのに、福 島第一原発ではこういう事故が簡単に起こってし まった. これは東電の姿勢に問題があるからにほ かならない、と畑村氏は言う13).

今回,東電福島原発1号機では非常用冷却装置 の非常用復水器(IC)が起動したにもかかわらず止 めてしまった.2号機,3号機では隔離時冷却系 (RCIC)が作動したものの,制御用の直流バッテリ 一の電気が,長時間の外部電源喪失を想定して設 計されていなかったために,なくなって止まって しまった.その結果,1,2,3号機とも冷却水が蒸発 してなくなり,炉心が融解するという事態を招い ている¹⁴⁾.

電力会社を糾弾すれば済むような単純な話では ない.原子力発電には国策として推進され,監督 されてきた背景がある.安全に関しては,内閣府 に設置されている「原子力安全委員会」が安全基 準を定め,それに基づいて審査・規制してきた. 各原子力発電所は,政府の監視の下に運転されて おり,東電は,「原子力安全委員会」の「安全基準」 に違反して運転していたわけではないから,今回 の事故の責任は,第一に,政府にある,と言われ るかもしれない.「第一に」と言えるかどうかは, 水掛け論になるだろうが,「やはり現実に作用する 権限をもった行為者にこそ,圧倒的に当事者責任 がある」¹⁵)とは言えるだろう.

政府(監督官庁)に関して,以下に興味深い2 つの証言が参照可能である.まず,出向先の電力 中央研究所で新しい原子力安全基準づくりの仕事 にも携わった経歴を持つ飯田哲也氏によれば、原 子力官僚は「過去の基準が間違っていてはならな いという大前提(無謬主義)のもとで、基準を厳 しくする場合でも緩める場合でも、その差を科学 や論理ではなく, 霞ヶ関文学で埋めてゆく¹⁶⁾」. また、長年、旧日本原子力研究所で原発の事故解 析と安全性の研究に携わってきた田辺文也氏によ れば,「2年間保安院に出向して経産省に戻ればい い、という人事制度」であるから、キャリア官僚 たちが、「自分がいる間だけは事故が起こらなけれ ばいい」と考えるのは自然なことで、「そのような 体制では長期的な安全対策が考えられないのも当 然である」17).

福島第一原発事故の背景には,社団法人日本原 子力産業協会理事である北村俊郎氏によれば,こ のような「監督官庁を中心とした形式主義」があ る.日本では一般的に訓練は形式的である.内容 については少しずつ手直しすればよいと言いなが らも,改善はなかなか進まない.不祥事が起きた 際は,監督官庁も電力会社もマスコミも,事故隠 しやデータ改竄,検査時の偽装の背景には,技術 力・管理力の不足があるとは考えず,モラルの問 題としてしまう.なぜ彼らが一線を越えてしまっ たか,真の原因には迫らず,モラルのほうにばか り目がいっているのは形式的だ,と北村氏は指摘 しているのである¹⁸⁾.

1-5 ロマンと説明責任のための美徳

とはいえ,もしわれわれが監督官庁の官僚諸氏 を単純に悪者扱いして済ませるとしたら,それこ そ形式的に過ぎる.電力会社についても同様であ る.北村俊郎氏によれば,日本では電力会社の経 営者も社員も,自分たちの会社が公益事業である ことを強く意識している.自分たちの仕事は他の 民間企業とは違い,社会基盤を支えるより重要な ものだという気持ちを持っている.なかでも原子 力部門にいる人は,この公益性意識に加えて,国 のために準国産エネルギーをつくり出すという大 きな役割をはたしていると確信していた¹⁹⁾.電力 の供給「責任」を果たそうという「倫理的」意識 と言ってもよかっただろう。

では、どこがいけなかったのだろう.原子力業 界内部で原発推進者として活動してきた北村氏の 次の証言が参考になる.北村氏はかつて六ヶ所村 の再処理工場を訪問したとき、当時の日本原燃

(株)の社長に「この仕事はまさに男のロマンだ」 と言われたことがあるという.資源小国日本を救 うために、世界ではじめて核燃料サイクルを完結 させる.そのためには要となる使用済燃料の再処 理工場の完成がどうしても必要であり、これほど 男のロマンをかきたてる仕事もないということで あった.地元に絶大な信頼を得ている社長が、東 京のオフィスでなく工場のある六ヶ所村にいるこ とを北村氏はうらやましく思った.原子力にかか わってきた人は誰もがそうした思いを持っている. それがどんな困難な道であっても、将来、人類が エネルギーで困らないために原子力発電をしてい るのだと.「だが」、と北村氏は続けるのである.

ロマンは、独りよがりにならないように注意 をしなくてはならない. 自分たちは無理解な 世間の被害者だと思い込む. 理解しないのは 相手が悪い. どうせ素人や部門外の人に説明 しても理解されるわけがないとあきらめる. 原発があらゆる技術や管理手法の集大成で あるにもかかわらず、原子力以外の産業界や 学会の人たちの知恵や経験を聴くことに熱 心ではなかったことも問題だ. /自分たちの やっていることは絶対に正しいと、自らを正 当化する.目的のためには手段を選ばない. 金がかかるのは仕方がない. このくらいは許 されるはずと自分で勝手に思い込むように なると危険だ.この考え方が、実質的に安全 であれば、少々のことはよいのではないか、 細かいことは情報公開しなくてもいいので はないか、などという独善的思考につながっ ていく. 民主主義国家では何を達成するにも, 時間と労力がかかる.男のロマンには辛抱強 さや誠実さ, それに完全な情報公開が必要だ

20).

文字通りの完全な情報公開が原子力関連施設の 安全・保安目的とどこまで整合するかは疑問であ るが、北村氏の言うような、「独りよがり」や「被 害者」意識や「自己正当化」や「独善」性などが、 少なからぬ当事者の傾向性として観察可能だった のではないかとの推測は、やはり生まれてしまう だろう、ただし、それらは、さほど特異な心性で はないし、場合によっては必要もしくは好ましい 状況すらある. だから、それら心性を帯びた当事 者が特別に「悪者」視されるのは間違っているの だが、リスクコミュニケーションにおける「辛抱 強さ」や「誠実さ」といった倫理的美徳が科学技 術者に期待されていることは、十分に理解可能で あろう.科学技術者は、公衆の健康や生活を大き く左右できるだけの理論的知識と潜在的力量を有 しているからである²¹⁾. そして,大きな力には 相応の責任が伴うからである.公衆 (パブリック) に対する「説明責任」(アカウンタビリティ)も、 今や倫理的に当然とされる、そのひとつだからで ある。

科学技術者も,自分の専門外の多くの事柄については立派な公衆(素人)であることを思えば,「説明責任」の倫理の普及は,科学技術者自身にとっても基本的に歓迎可能と思われる.そして,そのような責任を果たすロールプレイや,SGDや,OJTの中で,辛抱強さや誠実さといった美徳も徐々に養成されていくものと期待してよいだろう.

2. ルイス著『科学技術のリスク』のリスク

2-1 安全の情報依存性

そのような説明責任を,加藤尚武氏も最近著で ある『災害論』の中で,次のように専門家に求め ている.京都大学教授,原子力委員会専門委員, 鳥取環境大学学長などを歴任してきた哲学・倫理 学者である加藤氏によれば,安全について,十九 世紀の人間は,「自分で危険だと思ったら近づかな ければよい.政府が個人に安全について指示する 必要はない」と考えることができた.しかし,「す べては自己決定にゆだねよ」という自由主義は, 安全が専門的な検査に基づく信頼できる情報を提 供されることなしには確保できない「安全の情報 依存性」の時代には通用しない.専門家の集団が, まず安全について責任をもって確保し,信頼度の 高い情報を提示しなければならない²²⁾.

「リスク・ゼロはありえない」という言葉にも たれかかって、リスクを少なくする合理的な努力 を原子力業界は怠ってきたのではないかと加藤氏 は指摘する²³⁾.「大変な合理的努力をしてきたの に、それが素人には理解されないだけだ」との思 いが原子力工学者には募るものと予想される.だ がその思いが絶望にまで至ると、危険度が高まる. 独走の危険である.加藤氏は結論づける.

技術の水準が高くなると,専門家の独走の危険,すなわちテクノ・ファシズムの危険が高くなる.これに対して,技術情報を公開し,多くの国民が直接参加して決定すれば危険が避けられるという主張が,テクノ・ポピュリズムである.しかし,たとえば国民投票で科学的に間違った決定を下す可能性がある. 国会の審議でも科学的な間違いを含んだ法案が可決されることがある.専門的に見て正しく,なおかつ公平な公共的判断を行う可能性を切り開くことが,現代社会のもっとも重要な課題である²⁴⁾.

加藤氏が『災害論』で展開している多くの所見 は、基本的に核心を突いていると思われる.しか し、疑問に思える重要な論点もあった.それは、 ハロルド・W・ルイス著『科学技術のリスク』 (Technological Risk, Norton, 1990)の評価をめぐ る論点である.それを次に見てみたい.ハロルド・ W・ルイス(Harold Warren Lewis)氏はカリフォ ルニア大学の理論物理学者で、米政府の国防、原 子力その他のリスク評価にかかわる委員会の委員 長を務め、この著『科学技術のリスク』で米物理 学協会の科学著作賞(the Science Writing Award) を受けた.ルイス氏は 1923 年に N.Y.で生まれ、 2011 年 5 月 26 日に 87 歳で亡くなっている.

2-2 ルイス氏の誤りの影響説

加藤氏は『災害論』のまえがきで、ルイス氏の 著作を次のように紹介している.

ルイスには危険な傾向があって、安全のため のコストをなるべく低く抑えようとして、 「安全対策のやり過ぎ」を何度も非難してい る.この書物を東京大学の図書館で手に取っ たとき、(中略)その東大所蔵本には「東京 電力寄贈」というラベルが貼られていた.私 はこのラベルの表示に重大な意味があると 感じた.おそらく、東京電力の原子炉安全策 に関して重大な発言権をもつ人がこの書物 から強い影響を受けているのだろう、と私は 思った.原子力工学の学者がコーヒーブレイ クのときに話す「気の利いた」話題にはルイ スからの受け売りが多いことに、私は気づい ていたからである.ルイスの誤りをまとめて みれば、東京電力の犯した誤りの輪郭が描き 出せるかもしれない.(まえがきiii-iv)

っまり、ルイス氏の誤りが、東京電力の原子炉 安全策に悪影響を与えたのではないか、との仮説 を加藤氏は立てているのである.そして「ルイス を批判することが、いまもっとも重要な課題であ ると思う」とまで言っている.

ルイスの著作「科学技術のリスク」が,現在 までに行われてきた確率論的安全評価に対 する考え方の大筋を示している。(中略)ルイ スを批判することが,いまもっとも重要な課 題であると思う。第一の問題は,ルイスの「最 悪の事態を想定すれば安全のコストが無限 大になるから,最悪の事態への対処を設計に 織り込んではならない」という姿勢である。 過剰な安全策を採ってはならないというこ とを,ルイスは口を酸っぱくなるほど繰り返 し語っている²⁵⁾.

しかし、ルイス氏は本当に「最悪の事態への対 処を設計に織り込んではならない」と言ったのだ ろうか.破局的事態は起きない、などと安請け合 いしたのだろうか.そのような奇異な本が米国の 物理学協会賞を受け、中国語に訳され(1994年)、 日本語に訳され(1997年)、世界の科学技術者に受 け入れられるということが、あってよいのだろう か.ルイス氏の本には、もっとまともな教訓が多 いのではないか.それをきちんと書くことがフェ アではないか.

そのような一連の問題意識にもとづき,以下の 節を執筆することにした.そのために原書と日本 語訳書を取り寄せて比較検討した.その結果,両 者の間に微妙なずれがあることを発見した.それ も含めて以下に報告したい.なお,私が図書館相 互貸借制度のおかげで取り寄せることができた日 本語訳書は,たまたま千葉商科大学の所蔵本であ ったが、そこにもきちんと「東京電力株式会社寄 贈」印が押されていた(残念ながら国立東京工業 高等専門学校は寄贈の対象先リストからは漏れた ようだ).加藤氏は、東大図書館で見つけたこの押 印に着目し「東京電力の原子炉安全策に関して重 大な発言権をもつ人がこの書物から強い影響を受 けているのだろう」と、たぶん、大いに憂慮して 『災害論』で書いていたのであった.しかし私は、 むしろこの書物から読者が強い影響を受けること を歓迎する立場である.ただし、そのためには、 この書物は正確に訳され、丁寧に読まれねばなら ない.

2-3 美徳論としてのルイス本

以下では、ここで着目してもらいたいと私が考 えるルイス氏のいくつかの所見を、まず原文で引 用し、その下に、邦訳書²⁶⁾におけるそれの該当 箇所の訳文を紹介する.ついで、邦訳書を参考に しつつ、原文により正確な訳を心がけた拙訳例を 挙げる.邦訳書と拙訳との隔たりは、下線部を区 別することで対照可能にしてあるが、多くの場合、 微妙なものにすぎない.主眼はあくまで、ルイス 氏の主張それ自体の理解である.

(原書:19-20頁)

A low probability means only that; it does not mean that an event will never happen or can somehow be avoided. Acceptance of the fact that small probability doesn't mean zero probability is the beginning of understanding. In the case of nuclear war, one has to believe that the probability is precisely zero to insist that efforts to mitigate the potential consequences are misguided. Even though we all hope and work to avoid such a catastrophe, it is wishful thinking and a kind of arrogance to assume that success is guaranteed, and that we need not contemplate failure. According to the Rogers Commission report, that kind of misunderstanding of probability contributed to the loss of the space shuttle Challenger in 1986.

(訳書該当箇所:15-16頁)

低い確率とは文字通り,低い確率なのである. それは決して起こらないとか,なんとか避け

られるということを意味するのではない.小 さい確率とは確率ゼロということではない という事実を認めることが理解の第一歩で ある.核戦争の場合は、その結果起こり得る 災害の緩和に努力するなどは見当違いだと 主張するには、確率はゼロなのだと信じるほ かなかった.みんながそのような破局を免れ ることを希望し、そのために努力するとして も、その成功が保証されていないにもかかわ らず失敗した場合のことをじっくり考える 必要はないのだと仮定することは、一種の希 望的観測であり、思い上がりである. ロジャ ース委員会の報告によれば、この種の確率に ついての誤解が1986年のスペースシャトル, チャレンジャー号を失う原因になったので ある.

(拙訳)

低い確率とは文字通り、低い確率なのである. それは決して起こらないとか、なんとか避け られるということを意味するのではない.小 さい確率とは確率ゼロということではない という事実を認めることが理解の第一歩で ある. 核戦争が起こる確率がゼロだなどと信 じられる者だけが、核戦争の結果をましなも のにする努力はおかしいと言い張れる.みん ながそのような破局を免れることを希望し, そのために努力しているわけであるが, その 成功は保証済みで失敗時のことを熟慮する 必要はないのだなどと仮定することは、一種 の希望的観測であり、思い上がりである. ロ ジャース委員会の報告によれば、この種の確 率についての誤解が 1986 年のスペースシャ トル、チャレンジャー号を失う原因になった のである.

(原書: 48-49頁)

Up to this point, this chapter has probably (and not surprisingly)appeared one-sided, as if all the sins in the politicization of the risk have been committed by the anti-technology elite. Unfortunately, that is not so. The counterpoint to the politics of ignorance is the politics of complacency; embraced by more than a few of the guardians and keepers of risky technology. <u>The very low probabilities</u> that go with some of the more unlikely threats to our health and welfare---nuclear accidents, nuclear war, the greenhouse effect (high probability in the future, but just beginning), etc.---can be misleading. The fact that the disaster has not yet come has led all too many to believe that it never will, and to relax. It is not easy to maintain vigilance when major accidents never occur, especially when the most strident prophets of doom are demonstrably uninformed, or even worse. Ignorance on the one side and complacency on the other (especially when combined with mutual contempt) are twin threats to the rational management of risk.

(訳書該当箇所:40頁)

この章はここまで、多分(別に驚くことでは ないが)リスクをかけ引きの道具にしようと するすべての罪が,反科学技術エリートたち によって犯されてきたかのごとく一方的に なっている. しかし不幸にしてそうではない のである. 無知の政略の対極にあるのは自惚 れの政略である.この政略はリスクをともな う科学技術の少なからざる番人と保護者と にしっかりと抱き締められているのである. われわれの健康と幸福にほとんど考えられ ないような脅威が起こるきわめて低い確率 ----原子炉事故,核戦争,温室効果(将来は高 い確率になろうが、今はまだ始まったばかり である)等々…は誤解を招き易い.災害がま だ来たことがないという事実が、それは決し て起こらないと多くの人々に信じさせ、気楽 に過ごさせてきた. 大事故がまだ起こってい ない今、とくに一方で確かな知識をもたずに 事故が起きると喧しく言いたてる人たちが いるとき、寝ずの番を務めるのは容易ではな い. 一方の無知と他方の自惚れは(とくにこ れら双方がお互いに侮辱し合うとき)リスク を合理的に管理しようとすることに対して 双子の脅威となるのである.

(拙訳)

この章はここまで,リスクを政治的思惑の道 具にしようとするすべての罪が,反科学技術 エリートたちによって犯されてきたかのご

とく多分(別に驚くことではないが)一方的 になっている. しかし不幸にしてそうではな いのである. 無知の政略の向こうを張ってい るのは、自惚れの政略である.この政略はリ スクをともなう科学技術の少なからざる守 護者と保護者とにしっかりと抱き締められ ているのである.とても低い確率なので、そ の分いっそう、われわれの健康と幸福への脅 威も考えにくくなるもの----原子炉事故,核戦 争,温室効果(将来は高い確率になろうが, 今はまだ始まったばかりである)等々---は誤 解を招きやすい.災害がまだ来たことがない という事実が、それは決して起こらないと多 くの人々に信じさせ、気楽に過ごさせてきた. 大事故がまだ起こっていない今、とくに災い の預言者を最も声高に気どる人たちの無知 ぶりが明白であったり、あるいは彼らがもっ とたちの悪い場合には,事故に対して寝ずの 番を務めるのは容易ではない.一方の無知と 他方の自惚れは(とくにこれら双方がお互い に侮辱し合うとき)リスクを合理的に管理し ようとすることに対して双子の脅威となる のである.

(原書:225頁)

He is also a supporter of nuclear power, while an advocate of <u>more focused attention</u> to nuclear safety. He is therefore viewed by his pro-nuclear friends as <u>too anti-nuclear</u>, and by his anti-nuclear <u>friends</u> as too pro-nuclear. *C'est la vie*.

(訳書該当箇所:201頁)

著者はまた原子力の支持者であるが、一方、 原子力安全に関して、<u>さらに集中的注意</u>を払 うことを主張するものである.したがって、 原子力推進派の友人たちからは少し反原子 力的過ぎると思われているし、原子力反対派 の<u>仲間</u>からは原子力に賛成しすぎると思わ れている.《これが人生というものだ》.

(拙訳)

著者はまた原子力の支持者であるが、一方、 原子力安全に関して、<u>もっと焦点を絞った注</u> 意を払うことを主張するものである.したが って、原子力推進派の友人たちからは反原子 力的過ぎると思われているし、原子力反対派 の<u>友人たち</u>からは原子力に賛成しすぎると 思われている.《これも又人生哉》.

(原書:228-229頁)

The art of probabilistic risk assessment is most advanced for nuclear power, so we can calculate the probability of a major nuclear accident tolerably well.....The best current estimates for American reactors are that the probability of a core-melt accident is about one in ten thousand, per reactor-year, and the chance of a major release of radioactivity to the environment is a tenth or a hundredth of that. If these numbers are taken seriously, a core melt would be expected about once every hundred years among the hundred-odd reactors now operating. There is no way to predict with any confidence whether or not there will be a core melt before the turn of the century, because the art of prediction isn't that good. Probably not, but no promises. /The numbers are consistent....with the announced safety goals of the Nuclear Regulatory Commission, but should of course be taken with a grain of salt. The uncertainties are large. As time goes by, and with wisdom and experience accumulate, we will know more.

(訳書該当箇所:204頁)

確率論的リスク評価の技術は原子炉に対し て最も進んでいて、重大な原子炉事故の確率 をかなりよく計算することができる. ・・・ア メリカの原子炉に対する最近の最善の評価 は原子炉・年当たり約一万分の一であり,放 射性物質の環境への重大な放出の可能性は その十分の一か百分の一である. この数字を 真面目にとると, 炉心融解は現在運転中の百 基あまりの原子炉で百年ごとに一回起こる ことになるだろう. 今世紀が終わるまでに炉 心融解が起こるかどうかについては信頼性 のある予測方法はない.予測技術の精度はそ こまで良くはないからである. おそらくそう いうことはないだろうが保証はない. /この 数字は原子力規制委員会(NRC)の目標と一致 しているが・・・<u>もちろん丸呑みしてはいけな</u> <u>い</u>.不確定性は大きいのである.月日を経て, 知恵と経験が蓄積されればもっと多くのこ とが判るだろう.

(拙訳)

確率論的リスク評価の技術は原子力に対し て最も進んでいて, 重大な原子力事故の確率 をかなりよく計算することができる. ・・・ア メリカの原子炉に対する最近の最善の評価 によれば, 炉心融解事故の確率は原子炉・年 当たり約一万分の一であり、放射性物質の環 境への重大な放出の可能性はその十分の一 か百分の一である. この数字を真面目にとる と, 炉心融解は現在運転中の百基あまりの原 子炉で百年ごとに一回起こることになるだ ろう. 今世紀が終わるまでに炉心融解が起こ るかどうかについては信頼性のある予測方 法はない.予測技術の精度はそこまで良くは ないからである. 炉心融解の確率は小さいが, 起きないという約束はできない. /これらの 数字は原子力規制委員会(NRC)の目標と一致 しているが・・・もちろん割引きして聞かねば <u>ならない</u>.不確定性は大きいのである.月日 を経て、知恵と経験が蓄積されればもっと多 くのことが判るだろう.

(原書:231頁)

The accident began mechanically, was helped along multiple human errors, and was an inevitable consequence of complacency. <u>An</u> <u>industry that had never known an accident</u> <u>had come to believe it was impossible.</u> Sound familiar?

(訳書該当箇所:206頁)

[スリーマイル島の]事故は機械の故障から始 まり、多重のヒューマンエラーが加わって起 こったもので、自信過剰による避けられない 結果であった.<u>それまで事故を経験したこと</u> のなかった原子力産業は、事故は起こり得な いと信じるようになっていたのである.何だ か聞いたことがあるような気がしません か?

(拙訳)

[スリーマイル島の]事故の始まりはメカニカ ルだったが、それに多重のヒューマンエラー が加わって起こったもので、自信過剰による 避けられない結果であった.<u>それまで事故を</u> 経験したことのなかった産業が,事故は起こ り得ないと信じるようになっていた,とは, よくある話ではないか.

(原書:232頁)

There seems to be no therapy or prophylaxis for complacency, nor for the ills of a mature technology, except the sobering experience of <u>frequent non-catastrophic accidents</u>. If a probabilistic study predicts an accident probability that is not zero, and no responsible study will do otherwise, that means that the accident will happen---the only useful question is when. Failure to appreciate that can be damaging to the nation's health and well-being.

(訳書該当箇所:206-207頁)

自信過剰や成熟した技術のさまざまな病状 に対しての治療法や予防法は、<u>災害にはなら</u> ないような、よく起こる事故で苦い経験をす ること以外になさそうである.もし確率論的 調査が事故の確率がゼロでないことを予測 し、他にこれを否定する責任ある調査結果が ないなら、それは事故は起るということを意 味する----唯一有益な質問はそれがいつかと いうことである.このことの認識をあやまる と国民の健康と福利に害を及ぼすことがあ るのである

(拙訳)

自信過剰や成熟した技術のさまざまな病状 に対しての治療法や予防法は,<u>破局にまでは</u> 至らないですむような,よく起こる事故で苦 い経験をすること以外になさそうである.も し確率論的調査が事故の確率がゼロでない ことを予測し,他にこれを否定する責任ある 調査結果がないなら,それは事故は起こると いうことを意味する----唯一有益な質問はそ れがいつかということである.このことの認 識をあやまると国民の健康と福利に害を及 ぼすことがあるのである.

(原書:232-233頁)

One further observation, dear to the author's heart. (....) <u>It would have rated a full</u> <u>NTSB-type treatment from impartial experts</u>,

to squeeze all possible lessons from it as dispassionately as possible. An institutional structure for doing that sort of thing had been proposed two years before the accident, but was of course successfully resisted by NRC. (One of the arguments given at the time was that such an organization would have nothing to do, because there are no nuclear accidents.) Many events later, both small and large, there is still no such independent review body, which means that there exists no one with the responsibility to assess how well the regulatory organization, the NRC, is doing its job. The anti-nuclear people have no credibility, since their avowed objective is not to improve safety but to shut down nuclear power, and the NRC can hardly be relied upon to police itself. And Congress is no help./So whenever there is a disaster that commands public attention, the President will appoint a special presidential commission to review it. This will always result in severe criticism for the operating organization, criticism that will fade with time after the commission is disbanded. Complacency will then be allowed to return, and business-as-usual restored. Self-criticism doesn't come easily to humans. After Three Mile Island, President Carter tried to maintain some level of surveillance by appointing a President's Nuclear Safety Oversight Committee, but President Regan allowed it to die quietly. The most plausible explanation for the uncoordinated complexity of the nuclear regulatory system is that, deep down in their hearts, many participants still don't believe that a major damaging accident is possible. They are wrong.

(訳書該当箇所:207-208頁)

ここにもう一つの一歩進んだ見解があり、それは著者の心に強く訴えるものである. (・・・・)この事故からそして、考え得るあらゆる教訓を、可能な限り当然冷静に搾り取るために、公平な専門家による、完全にNTSB(国 家輸送安全審査会)タイプの取り組みをする ことに値するだろうというものである. この 種のことを実施する体制がこの事故の二年 前に提案されていたが、もちろん NRC の抵 抗が功を奏して立ち消えになった(当時の議 論の一つは原子炉事故はないのだから、そん な制度は意味がないというものであった). その後、大小取り混ぜて多くの出来事があっ たが、今だに独立の審査体制はなく、このこ とは規制当局である NRC の内容を評価する 責任を持つものがいないということである. 反原子力の人々の目的はその言動から、安全 の改善ではなく原子力の停止だから信用が できないし, NRC はとても自らを取り締ま ることはできない. そして議会は役に立たな い. /したがって,一般公衆の注意を引くよ うな災害が起こるといつも、大統領はそれを 検討するための特別大統領委員会を指定す る. それはいつも運転組織に対する厳しい批 判となり、その批判は委員会が解散された後 には時とともに消え去るだろう.そうすると, 自信過剰が再び息を吹き返し、以前と変わら ない通常業務が戻ってくるのである.自己批 判はなかなか人間自身にまでは届かない.ス リーマイル島事故の後,カーター大統領は大 統領の原子力安全監視委員会を設けてある 程度の監督をしようとしたが、レーガン大統 領はこれが静かに消えていくのをそのまま 放置した.原子力規制システムが未調整の複 雑さの中にあることの一番もっともらしい 説明は、多くの関係者がその心の奥底ではま だ重大事故が起こり得るとは信じていない ことである.彼等は間違っている.

(拙訳)

ここにもう一つの一歩進んだ見解があり、それは著者の心に強く訴えるものである. (・・・・)<u>この事故からの可能な全教訓を可能な</u>限り冷静に汲み取るためには、中立的な専門 家たちによる、完全に国家輸送安全審査会 (NTSB)タイプの取り組みが望ましかっただ ろう. この種のことを実施する体制がこの事故の二年前に提案されていたが、もちろん NRC の抵抗が功を奏して立ち消えになった (当時の議論の一つは、原子炉事故はないの

だからそんな組織を作ってもする仕事が何 もない、というものであった). その後、大 小取り混ぜて多くの出来事があったが、未だ に NTSB タイプの独立の審査体制はなく、こ のことは規制当局である NRC が仕事をよく 果たしているかについて評価する責任者が いないことを意味している.反原子力の人々 は、その目的はその言動から、安全の改善で はなく原子力のシャットダウンであるから, (その NRC 評価について) 信頼できないし, NRC には、自らを警察のように取り締まる ことはほとんど期待できない、そして議会も 助けにはならない. /したがって,一般公衆 の注意を引くような災害が起こるといつも, 大統領はそれを検討するための特別大統領 委員会を指定する. それはいつも運転組織に 対する厳しい批判となり,その批判は委員会 が解散された後には時とともに消え去るだ ろう.そうすると、自信過剰が再び息を吹き 返し,以前と変わらない通常業務が戻ってく るのである.人間にとって自己批判にはなか なか手が届かないものだ.スリーマイル島事 故の後、カーター大統領は大統領の原子力安 全監視委員会を設けてある程度の監督をし ようとしたが、レーガン大統領はこれが静か に消えていくのをそのまま放置した. 原子力 規制システムが未調整の複雑さの中にある ことの一番もっともらしい説明は、多くの関 係者がその心の奥底ではまだ重大事故が起 こり得るとは信じていないことである. 彼等 は間違っている.

(原書:237-238頁)

If there is a Chernobyl-like nuclear accident, what is the real threat to the public? <u>The risk</u> <u>comes</u> from the release of radioactive materials normally confined in the core of the reactor, which is in turn enclosed by the familiar dome-shaped containment building

 (\cdots) .The radiation is lethal stuff, not that a whiff of it will drop you in your tracks, but for the reasons mentioned at the beginning of the chapter---radiation can cause cancer. /The most important emergency-management issue in the event of a major nuclear accident is clear: to minimize the exposure of the public to radiation. In the worst cases one would also need to protect the food and water supplies, and deal with land recovery and cleanup. Smaller exposures to radiation do less damage, and there is a point below which the damage, if any, is beneath notice./ The first axiom about the management of a nuclear accident (and most other emergencies) is that we shouldn't worst-case ourselves out of a solution; we shouldn't base all our planning on the worst things we can imagine. They are at least likely, and planning for the worst can leave us unprepared for reality. Imagine a fire department spending all its training, and purchasing all its equipment, to fight a major "towering inferno" fire in a hundred-story skyscraper. The firemen would go through life waiting, and would have trouble dealing with the wastebasket and garage fires that are everyday events for a typical fire department.

(訳書該当箇所:211-212頁)

もしチェルノブイリのような原子炉事故が 起こったとすれば、一般公衆への実際の脅威 はどんなものだろうか?

リスクは通常は原 子炉の炉心に閉じこめられている放射性物 質が放出されることによって起こる. この放 射能はさらに、よく知られているドームの形 をした格納容器に閉じこめられる (・・・・). 放射線は、ちょっと触れただけで直ぐその場 で命に関わるようなものではないが、この章 の始めに述べた理由で死の原因---がんを起こ す---になり得る. / 重大な原子炉事故に際し て緊急時の最も重要な管理問題は明らかで ある. それは公衆の放射線被ばくを最小限に することである. 最悪の場合には, 水や食料 の供給を制限したり、土地の回復や浄化を手 掛けることも必要になる. 放射線被ばく量が 小さいときはそれだけ被害も少なく、仮に危 険があったとしても問題にならないレベル がある. /原子炉事故(そして他の緊急時で も)の管理で最初の原則は、決してその解決 のための最悪の場合を考えないことである.
 想像可能な最悪の場面についての計画を基礎にしてはならない.
 最も起こりにくい,最悪の事態に対する計画は、われわれを現実に対して何の準備もない状態に放置することになりかねない.
 消防署がすべての訓練や購入器財を、百階もある摩天楼の<タワーリング・インフェルノ>の大火災に対処するために当てたり、使ったりすることを想像して見るとよい.
 これでは消防士は一生待ちぼうけで、日常的な出来事であるゴミ箱やガレージの火災を扱うのに戸惑うことになるだろう.
 (拙訳)

もしチェルノブイリのような原子炉事故が 起こったとすれば、一般公衆への実際の脅威 はどんなものだろうか?原子炉は、よく知ら れているドームの形をした格納容器に閉じ こめられているのだが、その原子炉の炉心に 通常は閉じこめられている放射性物質が放 出されることからリスクが生じる. (・・・・). 放射線は、その一吹きだけであなたがその場 で絶命するようなものではないが、この章の 始めに述べた理由で致死的---がんを起こす---なものである.重大な原子炉事故に際して緊 急時の最も重要な管理問題は明らかである. それは公衆の放射線被曝を最小限にするこ とである. 最悪の場合には、水や食料の供給 を放射線から守ったり、地表の客土や除染を 手掛けたりすることも必要になる. 放射線被 曝量が小さいときはそれだけ被害も少なく, 仮に危険があったとしても問題にならない レベルがある. /原子炉事故(そして他の緊 急時でも)の管理で最初の原則は、最悪のケ <u>ースを考えすぎてわれわれ</u>が自らを解決不 能な状態に陥らせないことである.われわれ がつくる計画のすべてが、想像可能な最悪事 <u>態を前提に立てられるよう</u>なことがあって はならない27). 最も起こりにくい, 最悪の 事態に対する計画は、われわれを現実に対し て何の準備もない状態に放置することにな りかねない.消防署がすべての訓練や購入器 財を, 百階もある摩天楼の<タワーリング・ インフェルノ>の大火災に対処するために 当てたり、使ったりすることを想像して見る

とよい.これでは消防士は一生待ちぼうけで, 日常的な出来事であるゴミ箱やガレージの 火災を扱うのに戸惑うことになるだろう.

まとめ

ルイス氏は確かに「最悪の事態への固執は,最 悪よりはましな世界での失敗につながる」(原書 118 頁)と警告している.しかし,最悪の事態への 対処を設計に織り込んではならない,破局的事態 は起きない,などとは実際には述べていなかった. むしろ,科学者らしく慎重な言い回しを採用し, 原発の重大事故はいつ起こっても不思議ではない 印象を与えていた.われわれが簡単に「最悪への 備え」という言葉を口にしてしまう軽率さが戒め られていた(じっさい,福島第一原発でも,「周辺 事故への備え」の不備が,東日本を破局の何歩か 手前まで導いたのであった).自己批判と中立的専 門家たちによる独立の審査体制が求められ,自信 過剰と自惚れが戒められていた.

しかしそうした自己批判の求めや自信過剰の戒 めは、法的水準のものではなく、ただ論理的、科 学的なものでもない.謙虚さという美徳は、やは り倫理的水準のものと思われた.しかも、技術を 使いたいという欲求よりも国民の健康と福利を優 先するという意識が基本にある.

したがって,ルイス氏の本書(原書)は,他に いくつか理論的な問題箇所はあるかもしれないが, 技術者倫理文献として,知恵と謙虚さの美徳を説 く文献として,読まれるに値すると結論づけたい.

そうした傲慢さを戒める民主主義的な倫理や美 徳が求められるのは、もちろん科学技術者だけで はない.前出の田辺文也氏は次のように書いてい る.すなわち、科学的思考と民主主義、この二つ が欠如した「原子力村」とは、日本社会のさまざ まな「村」の典型にすぎなく、すべての日本人に とって決して他人事ではない.このことを忘れて、

「原子力村」の特殊性のみに、今回の原発事故の 原因および被害拡大要因を矮小化することに終始 するならば、これまでと同様、まったく事故から 学べなかった、ということになるだろうと²⁸⁾.

見えにくい人々に対する想像力を含むモラルの 不足を技術力や管理力でカヴァーすることが難し いのは、技術力や管理力の不足をモラルだけで補 うことができないのと同様である.さまざまな機 会をとらえての教育,とりわけ教養教育,自己教 育が必要と思われる.著者にとっては,本稿もそ うした自己教育に向けての試みのひとつに数えら れる.

註

 田中三彦『原発はなぜ危険か---元設計技師の証言』岩 波新書 1990 年 p.168

 2) 浜松照秀「日本のエネルギー安全保障を考える---生き 延びるために欠かせない原子力」OHM98(5) 2011-05, pp.30-31

3)脱原発は「アポロ計画のような挑戦」 持続可能性高 等研究所のテプファー氏に聞く 編集委員 滝順一

2011/8/3 7:00 http://www.nikkei.com./tech/ecology /article/

4) 『エコノミスト』 89(28)2011-06-21,p.20

5)「ガイア理論の提唱者 J.ラブロック博士に聞く」日本原子力学会誌 47(3)2005, p.28

6)http://www.guardian.co.uk/environment/2011/mar/1 5/japan-nuclear-explosion-energy-renewables

7) ジェームズ.E.ラブロック「惑星的観点から原子力を 考える」原子力資料 269, 1993.6.1pp.10-11

8) 前揭論文 p.8

9)毎日新聞 2011 年 12 月 31 日 9 時 37 分配信-Yahoo! ニュース

10)畑村洋太郎『未曾有と想定外 東日本大震災に学ぶ』 講談社現代新書 2011.7 p.150

11)田辺文也『まやかしの安全の国---原子力村からの告発』 角川 SSC 新書, 2011 年 11 月 p.169. ただし, 安全のた めには安全基準をただ上乗せすればよいというものでは ない. 浜松照秀氏は書いている. 「専門家が、新しい基準 を「よかれ」と思いつつ開発して従前の基準に上乗せし、 基準追加で「仕事をした」と満足するのはよくないわけ です. もしそうなら原子力発電設備の現場の専門家には 非現実的なものに見えるのでしょう. 一つ一つ守るのが 徒労に終わると感じながら基準に従っているとすれば制 度疲労そのものです. これでは現場の基準遵守が期待で きないと思うわけです.一方で、実務の専門家が「物事 を決めるのは自分たち、他の現場を知らない者たちに議 論させない」という思いがあるとすれば、原子力のエネ ルギー利用の現場に従事する姿勢を改める必要があるで しょう.」(浜松照秀『エジソンとフォードを超えろ!「エ ネルギー俯瞰学」のススメ』エネルギーフォーラム 2009

年 p.212 12)北村俊郎『原発推進者の無念---避難所生活で考え直し たこと』平凡社新書,2011年10月 pp.245-246 13)畑村洋太郎, 前掲書 p.109 14)田辺文也, 前掲書 p.142 15)飯田哲也,佐藤栄佐久,河野太郎『「原子力ムラ」を超 えて---ポスト福島のエネルギー政策』NHK ブックス 2011年7月 p.173 16)飯田哲也, 佐藤栄佐久, 河野太郎, 前掲書 p.25 17)田辺文也, 前掲書 p.49 18)北村俊郎, 前掲書 p.201 19)北村俊郎, 前揭書 p.232 20)北村俊郎, 前掲書 pp. 185-186 21)リスクコミュニケーションにおける美徳については、 拙稿「徳育としてのリスクコミュニケーション---技術者 倫理教育のために」(『東京工業高等専門学校研究報告書』 39(1)2007,pp.15-27 で論じた. 22)加藤尚武『災害論 安全性工学への疑問』世界思想社, 2011年11月 p.122 23) 加藤尚武, 前掲書 p.157 24) 加藤尚武, 前掲書 p.168 25) 加藤尚武, 前掲書 pp. 44-45 26)H.W.ルイス著, 宮永一郎訳『科学技術のリスク』昭和 堂 1997 27) "we shouldn't worst-case ourselves out of a solution"の文意解釈については、Dr. J. W. Gates から 参考意見を得られた.記して感謝申し上げる. 28)田辺文也, 前掲書 p. 191

(付記)本論文は平成 22-24 年度科学研究費補助金 基盤研究 C「技術者倫理教育における美徳育 成論等の新動向調査および技術者倫理教材の 建設的批判」課題番号 22520037 (研究代表者: 川北晃司 連携研究者:河村豊・浅野敬一・ 木村南・庄司良)による研究成果の一部である.

(平成24年1月6日 受理)

低学年数学学習法指導プログラム

波止元仁*, 齋藤四郎[†], 原井敬子[†], 藤川卓也[†]

A Program of Learning Methods of Mathematics to Early School Year Students Jin HATOMOTO, Shiro SAITO, Keiko HARAI, Takuya FUJIKAWA

Abstract. In 2010, we had a program of learning methods of mathematics for early school year students to teach the learning methods to our students. We emploied parttime lecturers teaching the learning methods mainly to the students and opened a mathematical counseling room for the purposes. This paper reports the results of the program.

0. 概要

平成22年度重点配分経費「低学年数学学習法指導プログラム」により,「学習指導員」を 雇用し「数学相談室」を開室して,主に低学年学生に対して数学学習法指導を行った。本 稿ではその結果を報告する。

1. 導入

近年では3年次における数学科目の学習内容の理解が困難になっている学生が多くなっ てきている。そのような学生の一部に、留年・退学という結果になってしまう学生がいる。 結果として東京高専における留年・退学者数、特に3年次の留年・退学率は近年では高く なってきているのかもしれない([1]p. 67)。以下においても述べるが、本校数学カリ キュラムの3年次数学科目は、ほぼ大学1年次での微分積分・線形代数学に相当する内容 であるのでとても重要である(図1参照)。

3年次数学科目の理解困難な学生は概ね,低学年次から学習法が身についておらず,そ の結果として学業不振となっているようである。低学年次に学習法が身についていない学 生の多くは、中学までの学習法から高専での学習法の変化に対応できず高専での学習法が 確立していない。また留年・退学に至らずとも、低学年次からの学習法の無さが低学年次 での数学科目の学習内容の理解を困難にしている要因である場合が多く見られる。こうい ったことにより、1、2年次での学業不振のつけが3年次にまわり、留年・退学という事 態に陥る学生が存在することは事実である。ここに学習法とは学問を系統的・計画的に学 ぶ方法をいう。

^{*}一般教育科非常勤講師

従って低学年次から学習法を身につけることは,低学年次からの数学科目を習得し,3 年次数学科目の学習内容の理解へとつながるものと思われる。これは結果として,留年・ 退学者を減らすための対策の一つと成り得るのかもしれない。東京工業大学や首都大学東 京といった大学等での(受け皿という意味での)学習指導システムを見ると,放課後に学 生のあらゆる質問に対応できるように,また学生が質問できない状況にはならないように, 専任教員とは異なる専門性をもつ人物が雇用され,「数学相談室」という低学年学生に対す る数学指導(学習法指導や問題解説)が行われている。このように,本校の指導システム としても,放課後での学生の数学指導を行なう数学教育・研究の専門性もつ人物が必要で あると思われる。

低学年学生に対する学習法指導は、大抵オフィスアワー等の放課後に数学教員の教員室 で行われるが、学習法指導は学生個別に行われるので一人の学生に対応できる時間が限ら れ、対応できる学生数は少数となる。また学生たちは、普段の授業等で低学年次初期から の学習法確立の必要性を数学教員より促され、学習法指導を求めて数学教員の所に訪れる ことが少なくない。しかし、3年次までの学生の数学指導に限ってみると、3年次までの 学生数約600人に対して数学教員約6人という内訳であるので、対応が不十分とならざ るを得ない。

一方において、低学年学生の学習法指導が重要である理由は本校数学カリキュラムにも ある。本校での数学カリキュラムの3年次における数学科目では、殆ど大学1年次での微 分積分・線形代数学を学ぶ(図1参照)。そのため3年次数学科目の習得は重要である。ま た3年次での数学科目は6単位あるので決して少なくない。そして、これらを学ぶために は1年次8単位、2年次6単位の数学科目の内容を理解しておかなければならない。

東京工業高等専門学校					高校3年	大学
1 年	代数 I 2単位	数と式、2次関数・2次方程式・2次不等式				
	代数Ⅱ 2単位	命題と証明、高次方程式・不等式、関数とグラフ				
		累乗と累乗根、指数の拡張、指数関数、対数関数、逆関数				
	幾何 I 2単位	三角比の基本的な性質、正弦定理、余弦定理				
		三角関数の定義と性質、加法定理とその応用				
	幾何Ⅱ 2単位	平面図形、2次曲線,不等式と領域,場合の数,順列,組合せ,二項定理,数列,数学的帰納法				
2 年	線形代数学 I	平面ベクトル、空間ベクトル、空間図形、行列				
		平面の1次変換と行列・逆行列・逆変換、掃き出し法(階数)、2元連立1次方程式				
	2+12	複素数平面、ド・モアブルの定理				
	微分積分学 I 2単位	関数の極限、連続関数の性質				
		微分の概念と基本公式、合成関数の微分法、三角関数の微分、逆三角関数の微分				
		指数関数・対数関数の微分、対数微分法、接線・法線、媒介変数表示の微分法				
		陰関数の微分法、平均値の定理、1次の近似式、関数の増減・極値とグラフ				
	微分積分学 Ⅱ	曲線の凹凸、方程式・不等式への応用、基本的な関数の不定積分・定積分				
	2単位	有理関数・無理関数の不定積分				
3 年	線形代数学 Ⅱ 2単位	行列式の定義と性質、逆行列、連立1次方程式				
		1次独立・1次従属、外積と行列式の図形的意味				
		行列の固有値と固有ベクトルと対角化、対称行列と直交行列				
	解析学A 2単位	数列の極限と無限級数、べき級数と収束半径、関数の近似式				
		高次導関数、テーラー展開・マクローリン展開、不定形の極限、ロピタルの定理				
		2 変数関数の連続性、偏導関数、全微分、合成関数の偏微分・陰関数の微分				
		2変数関数のテーラー展開・極値の判定、陰関数の極値・条件付極値				
		2 重積分、積分順序の交換、極座標による2 重積分				
	解析学B	定積分の続き、広義積分、曲線の長さ、重心と平均値				
	1単位	面積、体積、区分求積法、台形公式・シンプソンの公式				
	微分方程式 1単位	微分方程式の基礎、変数分離形、線形微分方程式など				

図1:本校数学カリキュラム

こういったことからも分かる様に3年次の数学科目を学ぶためには、1、2年次での数 学科目の理解は必要不可欠であり、そのためには1、2年次において学習法を身につけて おくことは重要である。従って学生の低学年次早期からの学習法指導は必要である。

以上の理由から本プログラムでは,低学年学生に対する学習法指導が必要であると考え, 昨年度重点配分経費により,「学習指導員」を雇用して「数学相談室」を開室し,数学教員・ 担任・学習指導員の連携の下で,数学相談室において学習指導員が主に低学年学生に対し 数学学習法指導を行った。

2. 現状と本プログラムの位置づけ

現在学内で行われている数学学習支援は,数学科教員による学習法指導と問題解説とT A(専攻科生)による自学自習室での問題解説である(下の図2参照)。本プログラムでは 平成22年度重点配分経費により,「学習指導員」を雇用し,「学習指導員」が待機して数 学学習法指導を行う場を「数学相談室」として,以下の(1),(2)の連携の下で「数学 相談室」を開室し,主に1,2年生に対して学習法指導を行った。

(1) 数学科教員と「学習指導員」が連携して個別の学生に応じた数学学習法指導を行う。

(2) クラス担任と「学習指導員」が連携して個別の学生に応じた数学学習法指導を行う。 (図2参照).

ここに「学習指導員」とは、高専や大学等での非常勤講師の経験を有する者、又は博士課 程に在籍する大学院生や博士課程修了者をいう。



3. 実施概要

昨年度重点配分経費により、主に1,2年生を対象として12月13日から2月7日ま での月~水の16時10分から18時10分の間「数学相談室」を開室した。「学習指導 員」として本校名誉教授の齋藤四郎先生、本校非常勤講師の原井敬子先生、藤川卓也先生 を雇用した。

・数学相談室の開室回数:18回、 延訪問人数:112人、 6.2人/1回

12月(5回):41人, 1月(8回):28人, 2月(5回):43人 数学相談室訪問学生に対し,主に以下の内容の学習法指導を行った:

1年生 代数 II: 対数の計算、幾何 II: 数列、場合の数。

2年生 微分積分 II: (不定積分の)置換積分、部分積分。

3年生 微分方程式:定係数2階線形微分方程式、線形代数 II:行列の対角化。 具体的に行った学習法指導として,主に中間試験の答案の間違った箇所の問題解説をし, 関連する理解不十分な単元の問題を課した。

4. 学生の意見

数学相談室終了後に学生にアンケートを取ったところ, 主に以下の意見があった:

・少しは勉強する習慣がついた。

・定期的に「数学相談室」を開室して欲しい。

・定期試験前には「数学相談室」の開室回数を増やしてほしい。

5. 学習指導員の意見

ある学習指導員の意見として、「Dを取った学生は(普段から勉強をしない傾向が見られ るので)教員が「数学相談室」に行くようにある程度強く勧めて、早いうちから学習法指 導した方が良いのではないか」というものがあった。

6. 終わりに

「数学相談室」は学生のニーズがあり,特に定期試験終了後と開始前ではそのニーズが高 くなる.数学相談室に来室した学生は,自分で学習することや学習法を教わることは重要 であることを感じているようであった。このような学生達の気持を大切にし,それらを持 続させることが重要である。ただ,一方において1月初めの数学相談室の開室日の中には 学生が全く来ない日があった。この企画を次年度以降実施する場合には,定期試験前後以 外で数学相談室に学生の来室が続くような工夫が必要である。例えば定期試験前後以外の 中だるみをする時期には,限られた授業時間の中では詳しく話すことが出来ない数学の適 用例・応用例を紹介することで学生の学習意欲を刺激するといった方法や,数学科の各担 当教員が工学での数学の適用に関するやや難度の高いレポートを課す等して,分からない 学生には数学相談室で学習法指導を受けてもらうといった方法である。多くの学生は数学 の適用については大変興味を持っているので,その興味を上手に利用すると普段の授業で の学習意欲を高めることの一助になる.次年度以降実施する場合は上で挙げたような工夫 を試みたい。 7. 今後に向けて

今回のような企画は、低学年学生に対して前期開始時から学生への周知を行い、前期中 間試験開始前または終了後から実施して、学習法が確立していないと思われる多くの学生 に対し、定期的にそして継続的に学習法指導を行うと(学習習慣を定着させることにも繋 がり)より効果的ではないかと思われる。

謝辞 本プログラムの企画と試みは重点配分経費(「低学年数学学習法指導プログラム」 代表者:波止元)によって実施することができました。ここに感謝の意を表します。また, この原稿を注意深く読み有益なご指摘をしていただいた東京高専一般教育科の中里肇先生, 村井三千男先生,竹田恒美先生に謝意を表します。

参考文献

[1] 東京工業高等専門学校「自己点検・評価報告書」「明日を拓く指標」第4号(2011)

(平成24年1月6日 受理)

弱双曲積構造をもつ微分同相写像に対する大偏差原理の上限評価

波止元仁*

Upper bounds on large deviations for diffeomorphisms with weak hyperbolic product structure

Jin HATOMOTO

概要

[16]では、[13]で導入した弱双曲積構造をもつ微分同相写像に対するlarge deviationとmoderate deviation の多項式的な上限評価を示した.これらの結果の適用例は、中心不安定方向がマヌビレ・ポモ写像型の挙動を する一様縮小方向をもつ部分双曲的微分同相写像である.本稿ではそれらを報告する.

In [16], we have established polynomial upper bounds on large and moderate deviations for diffeomorphisms with weak hyperbolic product structure studied in [13]. Applications for our results are some partially hyperbolic diffeomorphisms of which restriction on one dimensional center unstable direction behaves as a Manneville-Pomeau map. In this paper, we report several results of [16].

1 主結果

 $M \operatorname{tn}$ -次元リーマン多様体とする $(n \geq 2)$. $f: M \oplus \operatorname{ta} \otimes \operatorname{ch} \oplus \operatorname{ta}$ 埋め込み円盤 $\gamma \subset M$ が弱不安定円盤であるとは, $x, y \in \gamma$ に対して $d(f^{-n}(x), f^{-n}(y)) \to 0$ $(n \to \infty)$ が成立することである. 埋め込み円盤 $\gamma \subset M$ が弱安定円盤であるとは, $x, y \in \gamma$ に対して $d(f^n(x), f^n(y)) \to 0$ $(n \to \infty)$ が成立することである. 集合 $K^s \subset M$ に対して $\Gamma^u = \{\gamma^u(x)\}_{x \in K^s}$ が K^s -連続 C^1 弱不安定円盤族であるとは

*1 $k \in \mathbb{N}$ が存在して $D^u \in \mathbb{R}^k$ ($\exists k \in \mathbb{N}$)の単位円盤とする.

*2 $\Phi^u: K^s \times D^u \to M$ は次の性質を満たす:

- (i) $\Phi^u: K^s \times D^u \to \Phi^u(K^s \times D^u)$ は同相写像である,
- (ii) $x \to \Phi^u|_{\{x\} \times D^u}$ は K^s から Emb¹(D^u, M) への連続写像である,
- (iii) $\gamma^{u}(x) = \Phi^{u}(\{x\} \times D^{u})$ は弱不安定円盤である.

ここに, $\text{Emb}^1(D^u, M)$ は D^u からMへの C^1 埋め込み全体とし, C^1 位相をもつものとする. 同様にして集合 K^u に対して K^s -連続 C^1 弱安定円盤族も定義される.

集合 Λ' が (K^s , K^u)-積構造をもつとは K^s -連続 C^1 弱安定円盤族 $\Gamma^u = {\gamma^u(x)}_{x \in K^s}$ と K^s -連続 C^1 弱安定円盤族 $\Gamma^s = {\gamma^s(x)}_{x \in K^u}$ が存在して

- (i) $\dim \gamma^u + \dim \gamma^s = \dim M;$
- (ii) γ^{u} -disk は γ^{s} -disk に横断的に交わりそれらの間の角度は0 でない有界な数である;
- (iii) 各 γ^u は各 γ^s に唯一点で交わり;
- (iv) $\Lambda' = (\cup \gamma^u) \cap (\cup \gamma^s).$

*一般教育科

f が**弱双曲積構造**をもつとは, f は積構造をもつ集合 Λ をもち, Λ が以下の条件 (C1)– (C6) を満たすときをいう. 任意の部分多様体 $\gamma \subset M$ に対して m_{γ} は γ の上のルベーグ測 度を表す.

(C1) コンパクト集合 K^{s}, K^{u} が存在して Λ は (K^{s}, K^{u}) -積構造をもち,任意の $\gamma \in \Gamma^{u}$ に対して $m_{\gamma}(\gamma \cap \Lambda) > 0$ を満たす.

 $K^{s} \geq K^{u} \iota(C1)$ の集合とする. 集合 $\Lambda_{0} \subset \Lambda$ が *s*-部分集合であるとは,集合 $K_{0}^{u} \subset K^{u}$ が存在して $\Lambda_{0} \iota(K^{s}, K_{0}^{u})$ -積構造をもつ. *u*-部分集合も同様にして定義される. $\Gamma^{u} \geq \Gamma^{s}$ $\iota(C1)$ の中の Λ の定義の集合族とする. $x \in \Lambda$ に対して $\gamma^{u}(x), \gamma^{s}(x)$ はそれぞれ Γ^{u}, Γ^{s} の x を含む元とする.

(C2) 非交和s-部分集合列 $\Lambda_1, \Lambda_2, \ldots \subset \Lambda$ が存在して

- (a) 任意の $\gamma \in \Gamma^u$ に対して $m_{\gamma}(\gamma \cap (\Lambda \setminus \bigcup_{i>1} \Lambda_i)) = 0$,
- (b) 任意の $i \in \mathbb{N}$ に対して $R_i \in \mathbb{N}$ が存在して $f^{R_i}(\Lambda_i)$ は Λ のu-部分集合であり
- (c) 任意の $x \in \Lambda_i$ に対して, $f^{R_i}(\gamma^s(x)) \subset \gamma^s(f^{R_i}(x)) \ge f^{R_i}(\gamma^u(x)) \supset \gamma^u(f^{R_i}(x))$ を満たす.

回帰時間関数 $R: \Lambda \to \mathbb{N}$ を

$$R(x) = R_i \quad x \in \Lambda_i.$$

により定義する. このとき回帰写像 f^R: Λ () は

$$f^{R}(x) = f^{R(x)}(x) \quad (x \in \Lambda)$$

により定義される. $x, y \in \Lambda$ に対して, 分離時間 を

 $s(x,y) = \inf\{n \ge 0 \mid (f^R)^n(x) \ge (f^R)^n(y)$ は異なる Λ_i に属する }

により定義する. f^u は $f \circ \gamma \in \Gamma^u \sim 0$ 制限とし, det $(D_x f^u)$ は $D_x f^u \circ \tau$ コビアンを表 す. $C > 0 \ge 0 < \beta < 1$ は $f \ge \Lambda$ にのみ依存する定数とする.

(C3) 任意の $\gamma \in \Gamma^u$ に対して

$$\log \frac{\left|\det(D_x(f^{R_i})^u)\right|}{\left|\det(D_y(f^{R_i})^u)\right|} \le C\beta^{s(f^{R_i}(x), f^{R_i}(y))} \quad (x, y \in \gamma \cap \Lambda_i).$$

 $(X_1, m_1) \geq (X_2, m_2)$ は有限測度空間とする.可測な全単射写像 $T: (X_1, m_1) \rightarrow (X_2, m_2)$ が絶対連続であるとは T は m_1 -測度 0 集合を m_2 -測度 0 集合に移すことである. T が絶対 連続であるとき T の $m_1 \geq m_2$ に対するヤコビアンを $J(T) = d(T_*^{-1}m_2)/dm_1$ と表す.

(C4) 任意の $\gamma, \gamma' \in \Gamma^{u}$ に対して $\Theta: \gamma \cap \Lambda \to \gamma' \cap \Lambda$ は $\Theta(x) = \gamma^{s}(x) \cap \gamma'$ により定義 されるとき.

(a)
$$\left| \sum_{k=R_i}^{\infty} \log \frac{|\det(D_{f^k(x)} f^u)|}{|\det(D_{f^k(\Theta(x))} f^u)|} - \sum_{k=R_i}^{\infty} \log \frac{|\det(D_{f^k(y)} f^u)|}{|\det(D_{f^k(\Theta(y))} f^u)|} \right| \le C \beta^{s(f^{R_i}(x), f^{R_i}(y))}$$
$$(x, y \in \gamma \cap \Lambda_i),$$

(b) Θ は絶対連続で

$$\frac{d(\Theta_*^{-1}m_{\gamma'})}{dm_{\gamma}}(x) = \prod_{i=0}^{\infty} \frac{\left|\det(D_{f^i(x)}f^u)\right|}{\left|\det(D_{f^i(\Theta(x))}f^u)\right|}$$

(C5) 任意の
$$i, i' \in \mathbb{N}, \ell \in \{0, 1, \cdots, R_i - 1\}, \ell \ell' \in \{0, 1, \cdots, R_{i'} - 1\}$$
に対して
 $N = N(i, i', \ell, \ell') \ge 0$ が存在して $f^{-n}(f^{\ell}(\Lambda_i)) \cap f^{\ell'}(\Lambda_{i'}) \neq \emptyset$ $(n \ge N)$.

 \mathcal{H}_{η} はM上のヘルダー指数 η をもつヘルダー連続関数の集合とする.

(C6) 任意の $\varphi \in \mathcal{H}_{\eta}, x, x' \in \gamma^{s} \in \Gamma_{K_{j}^{u}}^{s}$ に対して $\gamma^{s} \cap \Lambda_{i}^{(j)} \neq \emptyset$ のとき $\ell \in \{0, \dots, R_{i}^{(j)}-1\}$ に対して

$$\chi(x, x', \ell) := \sum_{j=0}^{\infty} \left(\varphi(f^{j+\ell}(x)) - \varphi(f^{j+\ell}(x')) \right) + \psi(x, x', \ell) := \chi(x, x', \ell) + \varphi(f^{\ell}(x'))$$

このとき、或る $C_{\omega} > 0$ が存在して

- (a) $|\chi| \leq C_{\varphi}$,
- (b) 任意の $\gamma^{u}, \gamma^{u'} \in \Gamma_{K^{s}}^{u}, \gamma^{s}, \gamma^{s'} \in \Gamma_{K^{u}}^{s}, i \in \mathbb{N}, x, y \in \gamma^{u} \cap \Lambda_{i}^{(j)}, x', y' \in \gamma^{u'} \cap \Lambda_{i}^{(j)}, x, x' \in \gamma^{s}, y, y' \in \gamma^{s'}, \ell \in \{0, \dots, R_{i}^{(j)} 1\}$ に対して,

$$|\psi(x, x', \ell) - \psi(y, y', \ell)| \le C_{\varphi} \beta^{s(x, y)}.$$

 $\mu \ tf$ 不変ボレル確率測度とする.可測関数 $\varphi: M \to \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}, \tau \in (0,1], \epsilon > 0$ に対して

$$\operatorname{Dev}_{n}^{\tau}(\varphi,\epsilon;\mu) := \mu\left(\left\{\left|\frac{1}{n^{\tau}}\left(S_{n}\varphi - n\int\varphi d\mu\right)\right| \ge \epsilon\right\}\right)$$

とする. ここに $S_n \varphi := \sum_{i=0}^{n-1} \varphi \circ f^i$ である. 特に $\tau = 1$ のとき, $\text{Dev}_n(\varphi, \epsilon; \mu) := \text{Dev}_n^1(\varphi, \epsilon; \mu)$ と表す.

任意の $n \in \mathbb{Z}^+$ に対して $\{R > n\} := \{x \in \Lambda | R(x) > n\}$ とする. $\mathbb{R}^+ := [0, \infty)$. 数列 $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}, \{b_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ に対して $a_n = O(b_n)$ が成立するとは、或るK > 0が存在して任意の $n \in \mathbb{N}$ に対して $a_n \leq Kb_n$ を満たすことを表す.

[16]における主結果は次のものである.

定理 A ([16]). $f: M \oplus$ は弱双曲積構造をもつ微分同相写像とする. 或る $\gamma \in \Gamma_{K^s}^u$ が存在して $\int_{\gamma \cap \Lambda} Rdm_{\gamma} < \infty$ を満たすとする. このとき f は弱不安定多様体 $\cup_{j=0}^{\infty} f^j(\Gamma_{K^s}^u)$ 上の条件付確率測度がそれらの上のルベーグ測度に関して絶対連続である不変確率測度 ν をもち, 次を満たす:

任意の $p \in [1,\infty)$ と次の(i)~(iii)を満たす正の増加関数 $v : \mathbb{R}^+ \to \mathbb{R}$: (i) $\sum_{\ell=1}^{\infty} v(\ell) m_{\gamma^u}(\{R > \ell\}) < \infty$, (ii) $\{\frac{v(\ell)}{v(\ell+1)}\}_{\ell=1}^{\infty}$ も増加, (iii) $\sum_{\ell=1}^{\infty} \ell^{-\frac{1}{2}} v(\ell)^{-\frac{1}{2p}} < \infty$, と任意の $\varphi \in \mathcal{H}_{\eta}, \epsilon > 0$ と $\tau \in (\frac{1}{2}, 1]$, に対して

 $\operatorname{Dev}_{n}^{\tau}(\varphi, \epsilon; \nu) = O(n^{p(1-2\tau)})$

が成立する.特に $\tau = 1$ とすると, $\text{Dev}_n(\varphi, \epsilon; \mu) = O(n^{-p})$.

任意の $x \in M$ に対して, δ_x はx におけるディラック測度を表す. $n \in \mathbb{N}$ に対して $\delta_x^n := \sum_{i=0}^{n-1} \delta_{f^i(x)}$ とおく.

定理 B ([16]). 定理 A と同じ仮定の下で, *M* はコンパクトとする. $\mathcal{M}(M)$ は *M* 上の weak * topology をもつ確率測度の集合とする. このとき任意のコンパクト集合 $\mathcal{C} \subset \mathcal{M}(M)$ で $\nu \in \mathcal{C}$ を満たすもの対して

$$\nu\left(\left\{x\in M\left|\frac{1}{n}\delta_x^n\in\mathcal{C}\right\}\right)=O(n^{-p}).$$

定理 A は $\lambda \in (2,\infty)$ が存在して $m_{\gamma^u}(\{R > n\}) = O(n^{-\lambda})$ の場合に適用可能である. このとき,任意の $\lambda' \in (2,\lambda)$ と $p \in [1,\lambda'-1)$ に対して関数 $v : \mathbb{R}^+ \to \mathbb{R}$ を v(t) = 1 $(t \in [0,1)), v(t) = t^{\lambda'-1}$ $(t \in [1,\infty))$ と定義すれば定理 A の仮定を満たす.他方において, $\lambda \in (1,2]$ の場合は次の結果が適用可能である:

定理 C ([16]). $f: M \circlearrowleft$ は弱双曲積構造をもつ微分同相写像とする. $\lambda \in (1,2]$ が存 在して $m_{\gamma^{u}}(\{R > n\}) = O(n^{-\lambda})$ であれば,任意の $\varphi \in \mathcal{H}_{\eta}, \epsilon > 0, \tau \in (\frac{1}{2}, 1], \lambda' \in (1, \lambda)$ に 対して

$$\operatorname{Dev}_{n}^{\tau}(\varphi,\epsilon;\nu) = O(n^{-\lambda'+3-2\tau}).$$

ここに ν は定理 A のものである.特に $\tau = 1$ とすると, $\text{Dev}_n(\varphi, \epsilon; \mu) = O(n^{-\lambda'+1})$.

定理 D ([16]). 定理 C と同じ仮定の下で, *M* はコンパクトとする. このとき任意のコン パクト集合 $C \subset \mathcal{M}(M)$ で $\nu \in C$ を満たすものに対して

$$\nu\left(\left\{x\in M\Big|\frac{1}{n}\delta_x^n\in\mathcal{C}\right\}\right)=O(n^{-\lambda'+1}).$$

1.1 適用例

2次元トーラス \mathbb{T}^2 上の $C^{1+\alpha}$ -微分同相写像 $g: \mathbb{T}^2 \bigcirc (0 < \alpha < 1)$ は非双曲的不動点 $p \in b$ もち、下の仮定 A 1-4を満たすとする:

A 1. \mathbb{T}^2 上のノルム $\|\cdot\| \ge 0 < \lambda < 1 \ge D_x g$ -不変分解 $T_x \mathbb{T}^2 = E^s(x) \oplus E^u(x)$ が存在して E^s は余次元1の一様縮小する方向で,

$$||D_xg|_{E^s(x)}|| \le \lambda, \quad ||D_xg^{-1}|_{E^u(x)}|| \begin{cases} = 1 & (x=p), \\ < 1 & (x\neq p). \end{cases}$$

 $0 < \varepsilon \leq 1$ に対して, D_{ε} は R の中の原点を中心とする半径 ε の閉球とする. Emb^r($D_{\varepsilon}, \mathbb{T}^{2}$) ($r \geq 1$) は D_{ε} から $\mathbb{T}^{2} \sim \mathcal{O} C^{r}$ -埋め込みの全体とし, C^{r} -位相をもつものとする. 仮定 A 1 に より, [32] Theorem IV.1 から $\phi^{\sigma}(x)(0) = x$ ($\sigma = s, u$) を満たす 2 つの連続写像 $\phi^{s} : \mathbb{T}^{2} \rightarrow$ Emb¹(D_{1}, \mathbb{T}^{2}), $\phi^{u} : \mathbb{T}^{2} \rightarrow$ Emb¹(D_{1}, \mathbb{T}^{2}) が存在して局所安定多様体 $W_{\varepsilon}^{s}(x) := \phi^{s}(x)(D_{\varepsilon}^{s})$ と局所不安定多様体 $W_{\varepsilon}^{u}(x) := \phi^{u}(x)(D_{\varepsilon}^{u})$ は次を満たす: (i) $T_{x}W_{\varepsilon}^{\sigma}(x) = E^{\sigma}(x)$ ($\sigma = s, u$), (ii) $g(W_{\varepsilon}^{s}(x)) \subset W_{\varepsilon}^{s}(g(x))$, (iii) 或る $\varepsilon' > 0$ が存在して $g^{-1}(W_{\varepsilon'}^{u}(x)) \subset W_{\varepsilon}^{u}(g^{-1}(x))$.

局所安定多様体に沿ったポアンカレ写像のリプシツ連続性を求めるために,以下の仮定 をつける. **A 2.** ϕ^u は *M* から Emb²(D_1 , \mathbb{T}^2) への C^2 -位相に関して連続である.

A 3. $W^{u}_{\varepsilon}(p)$ を $[-\varepsilon, \varepsilon]$ と同一視するとき, $g|_{W^{u}_{\varepsilon}(p)}$ のグラフは次を満たす:

 $g|_{W^u_{\epsilon}(p)}(x) = x + x|x|^{\alpha} + o(x^2).$

A 4. g は位相混合的である.

[13] より, gは弱双曲積構造をもち, 或る $\gamma \in \Gamma^{u}$ が存在して $m_{\gamma}(\{R > n\}) = O(n^{-\frac{1}{\alpha}})$ である. 従って, 定理 A-D をgに適用すると次を得る.

定理 E ([16]). *g*は上のものとする. 任意の $\alpha \in (0,1)$ に対して*g*はSRB 測度 ν をもち, 任意の $\alpha' \in (\alpha,1)$ に対して次が成立する:

(1) 任意の $\varphi \in \mathcal{H}_{\eta}, \epsilon > 0, \tau \in \left(\frac{1}{2}, 1\right]$ に対して,

$$\operatorname{Dev}_{n}^{\tau}(\varphi,\epsilon;\nu) = \begin{cases} O(n^{(\frac{1}{\alpha'}-1)(1-2\tau)}) & (\alpha \in (0,\frac{1}{2}), \, \alpha' \in (\alpha,\frac{1}{2})), \\ O(n^{-\frac{1}{\alpha'}+3-2\tau}) & (\alpha \in [\frac{1}{2},1), \, \alpha' \in (\alpha,1)). \end{cases}$$

(2) 任意のコンパクト集合 $C \subset \mathcal{M}(\mathbb{T}^2)$ で $\nu \in C$ を満たすものに対して,

$$\nu\left(\left\{x\in M\Big|\frac{1}{n}S_n\delta_x\in\mathcal{C}\right\}\right)=O(n^{-\frac{1}{\alpha'}+1}).$$

謝辞 本研究は科研費(課題番号:23740136)の助成を受けたものである.ここに謝意 を表す.

参考文献

- V.Araújo, Large deviations bound for semiflows over a non-uniformly expanding base. Bull. Braz. Math. Soc. (N.S.) 38 (2007) 335-376.
- [2] M. Benedicks and L.-S. Young, Markov extensions and decay of correlations for certain Hénon maps, Astérisque, 261 (2000), 13-56.
- [3] L.Rey-Bellet and L-S.Young, *Large deviations in non-uniformly hyperbolic dynamical systems*, Ergod.Th.and Dynam.Sys. **28**(2008) 587-612.
- [4] R.Bowen, Equilibrium States and The Ergodic Theory of Anosov Diffeomorphisms, Lecture Notes in Mathematics, **470**, Springer-Verlag (1975).
- [5] D.L.Burkholder, Distortion function inequalities for martingales, Ann.Probab. 1(1973) 19-42.
- [6] D.L.Burkholder, Sharp inequalities for martingales and stochastic integrals, Astérisque. No.157-158 (1988) 75-94.
- [7] A.A.Castro, Backward inducing and exponential decay of correlations for partially hyperbolic attractors, Israel J.Math. 130 (2002), 29-75.

- [8] A. A. Castro, Fast mixing for attractors with mostly contracting central direction, Ergod. Th. and Dynam. Sys. (2004), 24, 17-44,
- [9] A.Dembo and O.Zeitouni, *Large deviations techniques and applications*, Second edition. Applications of Mathematics 38, New-York, Springer-Verlag (1998),
- [10] R.S.Eliss, Entropy, large deviations, and statistical mechanics, Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften [Fundamental Principles of Mathematical Sciences].
 271, Springer-Verlag, New York (1985).
- [11] J.Hatomoto, Diffeomorphisms admitting SRB measures and their regularity, Kodai. Math. J. (2006), 29, 211–226.
- [12] J.Hatomoto, Ergodic measures of SRB attractors, Tokyo J.Math (2007), **30**, 257–282.
- [13] J.Hatomoto, Mixing properties for invertible maps with weak hyperbolic product structure, Far East J. Math. Sci. 29(2) (2008), 257-310,
- [14] J.Hatomoto, Central limit theorem for invertible maps with weak hyperbolic product structure, Far East J. Math. Sci. (2008), 29(3), 729-752,
- [15] J.Hatomoto, Decay of correlations for some partially hyperbolic diffeomorphisms, Hokkaido Math.J.(2009) 38, 39-65.
- [16] J.Hatomoto, Polynomial upper bounds on large and moderate deviations for invertible maps with weak hyperbolic product structure, submitted.
- [17] H. Hennion and L. Hervé. Limit Theorems for Markov Chains and Stochastic Properties of Dynamical Systems by Quasi-Compactness. Lecture Notes in Math. 1766, Springer, Berlin, 2001,
- [18] G. Keller and T. Nowicki. Spectral theory, zeta functions and the distribution of periodic points for Collet-Eckmann maps. Comm. Math. Phys. 149 (1992) 31-69.
- [19] Y.Kifer, Large deviations in dynamical systems and stochastic processes, Trans.Amer.Math.Soc. **321** (1990), 505-524.
- [20] F.Ledrappier and J.Strelcyn, A proof of the estimation from below in Pesin's entropy formula, Ergod.Th.and Dynam.Sys. 2(1982) 203-219.
- [21] A.Lopes, Entropy and large deviations, Nonlinearily. 3 (1990), 527–546.
- [22] C.Maes and E.Verbitskiy, Large deviations and a fluctuation symmetry for chaotic homeomorphisms, Comm. Math. Phys. 233(1) (2003), 137–151.
- [23] V. Maume Deschamps, *Projective metrics and mixing properties on towers*, Trans.Amer.Math.Soc. **353** (2001), 3371-3389.

- [24] I.Melbourne, Large and moderate deviations for slowly mixing dynamical systems, Proc. Amer. Math. Soc. 137 (2009), no. 5, 1735–1741,
- [25] I.Melbourne and M.Nicol, Almost sure invariance principle for nonuniformly hyperbolic systems, Comm.Math.Phys. 260 (2005), 131-146.
- [26] I.Melbourne and M.Nicol, Large deviations for nonuniformly hyperbolic systems, Trans.Amer.Math.Soc. 360 (2008), 6661-6676.
- [27] S.Orey and S.Pelikan, Deviations of trajectory averages and the defect in Pesin's formula for Anosov diffeomorphisms, Trans.Amer.Math.Soc. 315 (1989), 741-753.
- [28] M.Peligrad, S.Utev and W-B.Wu, A maximal \mathbb{L}_p -inequality for stationary sequences and its applications, Proc. Amer. Math. Soc. **135** (2007), 541–550.
- [29] M. Pollicott and R. Sharp. Large deviations for intermittent maps, Nonlinearity 22 (2009), no. 9, 2079-2092
- [30] M.Pollicott, R.Sharp and M.Yuri, Large deviations for maps with indifferent fixed points, Nonlinearlity. 11 (1998), 1173–1184.
- [31] D.Ruelle, A measure associated with Axiom A attractors, Amer. J. Math, **98** (1976), 619-654.
- [32] M.Shub, Global Stability of Dynamical Systems, Springer Verlag, 1987.
- [33] Ya.G.Sinai, Gibbs measures in ergodic theory, Uspehi Mat. Nauk 27 (1972), 21-64.
- [34] L-S.Young, Some large deviation results for dynamical systems, Trans.Amer.Math.Soc. **318** (1990), 525-543.
- [35] L-S.Young, Statistical properties of dynamical systems with some hyperbolicity, Ann. Math. 147 (1998), 585-650.
- [36] L-S.Young, Recurrence times and rates of mixing, Israel. J. Math. 110 (1999), 153-188.

(平成24年1月6日 受理)

軸流ポンプのキャビテーション発生状況と壁面圧力変動 およびケーシング振動のウェーブレット解析

斉藤純夫*, 土方我久**

Occurrence of Cavitation in an Axial-Flow Pump and Wavelet Analysis of Wall Pressure Fluctuation and Casing Vibration Caused by Cavitation

Sumio SAITO, Gaku HIJIKATA

The use of more compact and faster pumps increases the risk of cavitation, which degrades pump performance and causes vibration, noise, damage, and other various phenomena, posing serious problems in pump operation. The relationship between the occurrence of cavitation in pumps and pump performance has been extensively studied for pumps of a wide range of specific speeds, from centrifugal to axial-flow pumps. The findings have been applied to the design of pumps required to provide high suction performance. For axial-flow pumps with an open impeller, the blade-to-blade pressure fluctuation due to cavitation directly causes casing vibration and produces external noise. Thus, it is extremely important to understand the detailed mechanisms of cavitation occurrence and development. It has previously been discussed that changes in the performance of axial-flow pumps with the development of cavitation are closely related to changes in flow conditions at the inlet and outlet of the impeller and that wall pressure fluctuations are strongly associated with the occurrence of cavitation in the tip clearance region. This paper presents a wavelet analysis of wall pressure fluctuation and casing vibration caused by cavitation in an axial-flow pump that allows easy observation of cavitation. It closely examines spatial and temporal changes in the pressure outlet. This paper also suggests that there is a characteristic bandwidth useful for detection of cavitation in the tip clearance region.

Keywords : Axial-Flow Pump, Cavitation, Pressure Fluctuation, Flow Induced Vibration, Wavelet Analysis

1. 緒 言

ポンプの小型,高速化に伴い,キャビテーショ ン発生の危険性が増大し,ポンプ性能の低下のみ ならず,振動,騒音や損傷など様々な現象が生じ, ポンプの運転上,大きな問題となっている⁽¹⁾.

ポンプのキャビテーション発生状況と性能との 関連については、遠心から軸流までの広い比速度の 範囲のポンプについて、多くの研究がなされており ⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、その成果は高吸込み性能を要求されるポンプ の設計に応用されている⁽⁵⁾.

特に,軸流ポンプのように開放型羽根車の場合, キャビテーション発生による翼間の圧力変動が直 接,ケーシングの振動をもたらし,その結果,外 部へ騒音として伝播するため,キャビテーション 発生から成長までの詳細な挙動を把握しておくこ とが極めて重要である.

軸流ポンプのキャビテーション発達に伴うポン プ性能の変化は、羽根車前後の流動状態の変化と 密接に関連し⁽⁶⁾、さらに、壁面圧力変動がチップ クリアランス部のキャビテーション発生状況と強 く関係することを既に明らかにした^{(7) (8)}.

そこで、本報では、キャビテーション発生状況 の観察の容易な軸流ポンプを対象に、キャビテー ション発生の有無による壁面圧力変動およびケー シングの振動のウェーブレット解析を行い,羽根 車入口部から出口部にかけての流れ方向の各部位 における圧力変動波形の時間的および空間的変化 について詳細に検討した.また,あわせてチップ クリアランス部のキャビテーション発生に関し, その検知に有効な特徴的な周波数帯域があること を提示した.

2. おもな記号

- g : 自由落下の加速度 = 9.8 [m/s²]
- H : 揚程 [m]
- Hs::吸込み管内の圧力ヘッド(絶対圧)[m]
- H_{sv}:有効吸込水頭(NPSH)
 - $= H_s + (v_s^2/2 g) h_v$ [m]
- h_v : 水の飽和蒸気圧ヘッド [m]
- *L_P*:音圧レベル [dB]
- N_S : 比速度 [m³/min, m, min⁻¹]
- P : 軸動力 [kW]
- p : 圧力 [Pa]
- *Q* :流量 [m³/min]
- V_a : 振動加速度 [m/s²]
- vs : 吸込み管内の流速 [m/s]
- η : 効率 [%]

3. 実験装置と方法

3・1 実験装置と供試ポンプ 図1は供試軸 流ポンプの概略を示したもので,羽根車部に発生 するキャビテーションの挙動を解明することを主 眼にしたため,羽根車部のケーシングは透明のア クリル樹脂製としてキャビテーション発達状況の 観察ができるようにし,さらに羽根車下流部のデ ィフューザベーンを取り除き,代わりに十文字の サポートを設置した.

供試ポンプは約2 [m³]の容量をもつタンクを備 えた密閉回流装置に組み入れ,流量はオリフィス (絞り孔径比 $\beta = 0.837$)を用い,その差圧を差圧 変換器(型式 PD-1KA,共和電業製)により,ま た,ポンプ前後の圧力も同様に差圧変換器(型式 KH52,長野計器製)により測定した.

供試羽根車は,公称比速度 N_s=1600 [m³/min, m, min⁻¹]の軸流羽根車で,その主要諸元を表1に示す.



Fig.1 Experimental apparatus

Table 1	Dimen	sions	of test	impeller

Item	Dimension		
Tip diameter D_t [mm]	144.4		
Hub diameter D_b [mm]	63.4		
Hub – tip ratio	0.44		
Number of blades	4		

3・2 ケーシング壁面の圧力変動,振動および音 圧レベルの検出と解析方法 羽根車の入口部か ら出口部にかけての流れ方向の各部位におけるケ ーシング壁面の圧力変動は,図2に示すP₁からP₃ の3箇所の位置に歪ゲージ式圧力変換器(型式 PGM-2KC,共和電業製)を取り付けて測定した.

ケーシングの振動は加速度ピックアップ(型式 NP-3331,小野測器製)を羽根車中央のP₂の位置の ケーシング上に取り付け,また,音圧レベルは同じ P₂の位置においてケーシングより 5 [mm]離れた箇 所に騒音計(型式 LA-1210,小野測器製)を設置し て測定した.

キャビテーションの発達に伴うケーシング壁面 の圧力変動および振動加速度に関しては、それらの 時間軸波形と、時間の変化に伴う周波数解析である ウェーブレット解析のパワースペクトルをあわせ て表示することにより評価した.

ウェーブレット解析にあたり,サンプリング周 波数は 40 [kHz]とし,ウェーブレット解析の窓関 数である Mother Wavelet には Gabor 関数を用いた⁽⁹⁾.



Fig.2 Attachment position of sensors

3・3 軸流ポンプの流れ解析モデルと境界条件

流れ解析プログラムには、ソフトウェアクレイド
 ルの "SCRYU/Tetra Version 8" ⁽¹⁰⁾を使用した.
 SCRYU/Tetra は有限要素法をベースとした非構造
 格子を用いた汎用 3 次元熱流体解析ソフトウェア
 である.

生成した軸流ポンプの解析モデルを図3に示す. 解析を容易にするため、実験装置には付帯してある整流板や十文字のサポートは取り除いた.

解析モデルは,全長 *L*=2000 [mm],内径 *D* =145.2 [mm]とし,流入面から羽根車までは十分に 長い直管(内径の約6倍)を設けた.また,翼先 端とケーシングとの隙間(チップクリアランス) は 0.4 [mm]である.



Fig.3 Simulated region of axial-flow pump

メッシュは、羽根車部の要素数を268万,その 他の配管部の要素数を145万とし、合計413万要 素とした.羽根車付近は流れが急激に変化する領 域であるので、他の領域よりも微細な要素を生成 した.計算精度の観点から、管路壁面近傍や羽根 車表面などの境界層部はプリズム(三角柱)要素、 その他の空間はテトラ(四面体)要素を配置した.

乱流モデルには SST k-ω 方程式を用い,羽根車の回転は実験と同じ回転数を与えた.境界条件として,流入面を圧力基準面とし,流出面は流出流速を指定した.

以上のモデルを用い,十分な有効吸込水頭状態 でのポンプ性能を検討する場合には,非キャビテー ション解析により,また,キャビテーション発生時 の挙動を検討する場合には,キャビテーション解析 を行うことにより評価した.このキャビテーション 解析においては,解析時間の短縮と精度向上のた め,非キャビテーション解析で得られた定常状態 の結果を初期状態として用いることにより解析を 行った.さらに,流入面での圧力を指定すること で有効吸込水頭の値を調整した.

4. 実験結果と考察

4・1 供試軸流ポンプの一般性能

図4は十分な有効吸込水頭状態における供試軸 流ポンプの性能を示す.

最高効率点流量はQ=2.1 [m³/min]で,管路の抵抗 曲線から決まる最大流量はQ=2.3 [m³/min]である. また,Q=1.7 [m³/min]より小流量側で軸流ポンプに 特徴的な右上りの揚程-流量曲線を示している.



Fig.4 Axial-flow pump characteristic (Experiment and analysis (non-cavitation condition))

非キャビテーション解析による解析結果を見る と、 $Q=0.6 [m^3/min]$ 以上の流量域での揚程は、定 性的には実験結果と同じような変化をしている.

これに対し, $Q = 0.6 [m^3/min]$ 以下の流量域では, 揚程の解析値が実験値よりも小さくなっており, 羽根車部における逆流の発生が影響しているもの と考えられ,さらにこの場合,解析が不安定にな る傾向もみられた.

また,実験においては,揚程の右上り特性がQ=1.7 [m³/min]に現れていたが,解析では,Q= 1.8 [m³/min]において発生する.この原因として,解析 モデルにおいては羽根車下流の十文字のサポート を設置していないための影響と考えられる.

4・2 キャビテーション発生状況と性能変化

4・2・1 流量の変化に伴うキャビテーション 発生の様相

図5は最高効率点流量Q=2.1 [m³/min]において, 一例として有効吸込水頭 $H_{sv}=4.2$ [m] 時の羽根車 のチップクリアランス部および翼負圧面に発生す るキャビテーションの様相を示したものである.



Fig.5 Example of cavitaion pattern $(Q = 2.1 \text{ [m}^3/\text{min]}, H_{sv} = 4.2 \text{ [m]})$

そこで羽根車の翼面において最も相対速度の大 きいチップ部に発生するキャビテーションに主に 着目し、流量および有効吸込水頭 H_{sv} の変化によ るチップクリアランス部に発生するキャビテーシ ョン (K₄) と翼負圧面上に発生するシート状のキ ャビテーション (K₁)の発達状況を図6に示す. 図中には、一つの指標として、揚程が5%低下す る限界点を結ぶ曲線も併記した.

Q = 1.7 [m³/min]より大きい流量域においては, K₄キャビテーションが最初に発生するのに対し, Q = 1.7 [m³/min]より小さい流量域では, 翼に対し 迎え角を持って流れが流入するため, 翼負圧面で の K_1 キャビテーションが先に発生している. さら に有効吸込水頭が低下すると, K_1 および K_4 キャビ テーションとも大きく発達している. 揚程が 5% 低下する限界点は, $Q=1.7 [m^3/min]$ より大きい流 量域では, K_1 キャビテーションが約 20 [mm]程度 発達した状態に, また, $Q=1.7 [m^3/min]$ より小さ い流量域では, K_4 キャビテーションが, ほぼ 20 [mm]発達した状態に対応している.



Fig.6 Cavitaion development aspect

4・2・2 有効吸込水頭(NPSH)の変化に対するポンプ性能の実験結果および解析結果の比較

図 7 および図 8 は最高効率点流量 Q = 2.1[m³/min]と,右上りの揚程特性を示す Q = 1.7[m³/min]において,有効吸込水頭の変化に対する揚 程,軸動力および効率の変化を示したものである. 図中には前述のキャビテーション解析により求め た結果も解析点がわかるようプロットで併記した.

また,図7には最高効率点流量Q=2.1 [m³/min] において,有効吸込水頭(NPSH) H_{sv} の変化によるキャビテーションの発達状態もあわせて示す

(図7(b).).

図 7(a) (b)を対比させて評価すると, Q = 2.1[m³/min]のキャビテーションの発生状況について は, $H_{sv} = 8.1$ [m]付近で, チップクリアランス部に 発生するキャビテーション K₄が初生し,有効吸込 水頭の低下により, H_{sv} の値が 6.5 [m]付近で K₄キ ャビテーションに加え, K₁キャビテーションも複 合してわずかに発生している.また, $H_{sv} = 5.3$ [m] 付近で翼負圧面に発生するシート状の K₁キャビ テーションが 5 [mm]程度まで発生していることが 観察できる.







Fig.8 Cavitaion performance (Experiment and analysis (cavitation condition) ($Q = 1.7 \text{ [m}^3/\text{min]}$)

さらに, H_{sv} =2.0 [m]付近から軸動力の増大とと もに揚程の低下が見られ⁽⁶⁾,翼面全体にわたりキ ャビテーションが大きく発達している.

キャビテーション解析結果は実験結果と同様に、 有効吸込水頭 H_{sv} が約2[m]よりわずかに大きいと ころから揚程が低下し始めており、その変化の傾 向は定性的には一致している.

また、一例として揚程 3%低下点の有効吸込水頭 について評価すると、実験結果の H_{sv} =1.99 [m]に 対し、解析結果は約 H_{sv} =2.07 [m] となっており、 その差は 4%程度である.

次に、図8のQ=1.7 [m³/min]においては、図6 のキャビテーション発達状況と対比して評価する と、 H_{sv} =7.6 [m]付近で、最初にシートキャビテー ション K₁が初生し、その後、 H_{sv} =6.3 [m]付近で、 キャビテーション K4の初生が観察できる.

さらに, *H_{sv}*=4.0 [m]付近から軸動力が増加するのに伴い揚程の低下が見られ,このため効率が急激に低下している.

揚程の解析結果については, *Q*=2.1 [m³/min]の 場合と同様,その変化は実験結果とほぼ同じ傾向 を示している.

4・3 キャビテーション発生状況と壁面圧力変 動および振動加速度のウェーブレット解析

4・3・1 最高効率点流量における壁面圧力変 動の有効吸込水頭(NPSH)による変化

図 9(a) (b) (c)は,最高効率点流量 Q=2.1 [m³/min] 時の羽根車の入口部から出口部にかけての P₁から P₃の 3 箇所の位置で測定した壁面圧力変動波形と その周波数分析結果を対比させ,有効吸込水頭の変 化に対して表したものである.

図 9(a)の P₁の位置での圧力変動波形は翼先端隙 間部からの K₄キャビテーションが初生する H_{sv}= 8.1 [m]時に高い周波数成分がのり,その成分は約 4 [kHz]付近にあることがわかる.

次に、図 9(b)より、 P_2 の位置での圧力変動波形 は、 H_{sv} =5.3 [m]時に P_2 の位置まで K_4 キャビテー ションが成長し、あわせて K_1 キャビテーションも 初生した状態で高い周波数成分が現れている.

さらに、図 9 (c)の P₃の位置の圧力変動波形を見 ると、 H_{sv} = 10.4 [m]から 8.1 [m]までは、P₁ および P₂ の位置における波形と同じような形状をしてい る.これに対し、 H_{sv} = 5.3 [m]から H_{sv} = 3.4 [m]に かけては、K₄キャビテーションが翼後縁まで成長 し、かつ、K₁キャビテーションも大きく発達した 状態となるため、圧力変動波形は大きな時間的変 化の挙動を示している.

以上の結果をもとに、それぞれの測定位置において、圧力変動波形が変化する有効吸込水頭の場合について、ウェーブレット解析結果と比較して記載したものが図10である.

図中において, 圧力変動の時間軸波形を左側のた て軸として表し, それをウェーブレット解析した周 波数の時間的変化を右側のたて軸として併記した.

ここで、パワースペクトルの周波数における濃 淡の違いにより、ウェーブレット係数(W係数) のパワー値を表し、その大きさが高いほど濃く表 示されている.



Fig.9 Pressure fluctuation and spectra of frequency $(Q = 2.1 \text{ [m}^3/\text{min]})$

図 10 (a)に示した圧力測定位置 P_1 における圧力 変動波形を見ると, $H_{sv} = 10.4$ [m]ではキャビテー ションの発生は見られないため, 周期的な圧力波 形となっている.これに対し, $H_{sv} = 8.1$ [m]では翼 先端隙間部から K_4 キャビテーションが初生する ため, 圧力波形に高周波数成分がのり,約4 [kHz] 付近にパワースペクトルの強い領域が現れている.

図 10 (b)に示した P_2 の位置における圧力変動に ついては, H_{sv} =8.1 [m]では K_4 キャビテーションが P_2 の位置まで成長していないため, P_1 の H_{sv} =10.4 [m]の場合と同様な挙動を示している.

さらにキャビテーションが発達した H_{sv}=5.3

[m]になると、 P_2 の位置まで K₄キャビテーション が成長し、あわせて K₁キャビテーションも初生す るため、 P_1 の位置での H_{sv} = 8.1 [m]の場合と同じよ うに、約4 [kHz]付近にピークを持つパワースペク トルとなっている.

図 10 (c)の P₃の場合については, P₂の位置まで K₄キャビテーションが成長した $H_{sv} = 5.3$ [m]から さらに翼後縁まで発達し,かつ K₁キャビテーショ ンも大きく発達した状態にあたる $H_{sv} = 3.4$ [m]に おいても,圧力変動波形の時間的変化は同じよう な挙動を示している.

この変動の挙動は、P₁および P₂の位置における それらの変化とは異なり、明確なパワースペクト ルの変化は見られない.これはキャビテーション の気泡が翼後縁付近まで大きく成長し、それが一 つの気泡群として時間的に変動していることによ るものと考えられる.

以上の結果より、それぞれの測定位置において キャビテーション発生に伴い顕著な周波数域の変 化のあった4 [kHz]に着目して、有効吸込水頭 H_{sv} の変化によるそれらのレベルの変化を揚程の変化 とあわせて示したものが図 11 である.図中には、



 $(Q = 2.1 [m^3/min])$

 P_1 の位置における圧力変動のZN周波数(= 99.2 [Hz]) (Z=4, N=24.8[s⁻¹]) 成分のレベルの変化 も併記した.

有効吸込水頭 H_{sv} の低下に伴う ZN 周波数成分 の変化は, K_4 キャビテーションの初生時よりも K_1 キャビテーションの発生に伴い増加する傾向を示 している.

これに対し、4 [kHz]の周波数成分の変化につい は、 P_1 から P_2 の位置の歪ゲージ式圧力変換器の測 定部まで K_4 キャビテーションが発達した時点で 急増しており、このチップクリアランス部に発生 する K_4 キャビテーションの発達状況と密接に関 連していることがわかる.



Fig.11 Changes in 4 [kHz] level due to NPSH $(Q = 2.1 \text{ [m}^3/\text{min}\text{]})$

4・3・2 最高効率点流量における振動加速度 および音圧レベルの有効吸込水頭(NPSH)によ る変化

図 12 に P₂の位置で測定した振動加速度の波形 とそのウェーブレット解析の結果を有効吸込水頭 の変化に対して示す.

 K_4 キャビテーションが初生し、わずかに成長し た状態の H_{sv} =7.9 [m]になると、3~4 [kHz]の周波 数成分が増加している. さらにキャビテーション が発達すると 2.5~6 [kHz]の周波数域の成分がよ り支配的になっている.

この周波数域は羽根車の基本周波数成分である ZN 周波数 (= 99.2 [Hz]) からは大きく離れており, かつ,汎用構造解析ソフト (SolidWorks)⁽¹¹⁾を用 いて計算したアクリルケーシングの固有周波数で ある 1.7 [kHz]と一致しない.そのため上述の 2.5 ~6 [kHz]の周波数域の周波数成分に着目すること により,キャビテーション発生の検知が可能であ るといえる.

図 13 は最高効率点流量 Q = 2.1 [m³/min]におけ る有効吸込水頭の変化に対する振動加速度と騒音 (音圧レベル)を揚程の変化とあわせて示したもの である.

キャビテーション K₄ が発生し始めるにつれて, 振動加速度および音圧レベルが増加していき,キ ャビテーション K₁および K₄が非常に大きく発達 した揚程低下点付近では急激に増加している.

これより、キャビテーションの発達による振動 加速度と音圧レベルの変化は、極めて強い相関関 係にあることがわかり、ケーシングの振動から外 部へ騒音として直接伝播していることを示してい る.



Fig.12 Wavelet analysis of vibration fluctuation $(Q = 2.1 \text{ [m}^3/\text{min]})$



Fig.13 Vibration acceleration and sound pressure level ($Q = 2.1 \text{ [m}^3/\text{min]}$)

4・3・3 最高効率点流量における翼負圧面上の渦度分布の有効吸込水頭(NPSH)による変化

図 14 は Q = 2.1 [m³/min]において, 流れ解析によ り求めた翼負圧面上の渦度分布のコンタ図を示し たものである.

渦度ベクトルは流体の速度ベクトル Vの回転 (∇×V)で表され,次式により算出できる.

$$\nabla \times V = \xi i + \eta j + \zeta k$$

ただし,

 $\xi = \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} , \quad \eta = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial \omega}{\partial x} , \quad \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$

である.ここで(*u*, *v*, *w*)は,流速の(*x*, *y*, *z*)成分であり, (*i*, *j*, *k*)は(*x*, *y*, *z*)軸上の単位ベクトルである.

図14においては、*∇×V*の絶対値をとり、渦度 ベクトルの大きさを渦度として表している.図中 の4枚の翼について、渦度の極大値とその位置を 併記したが、有効吸込水頭*H_{sv}の*値にかかわらず、 すべて翼チップ部の入口部に現れている.

また,図15は翼入口部と翼出口部の渦度の値の 変化を各翼について,有効吸込水頭の変化に対し て示したものである.

実験においては、 $H_{sv} = 5.3$ [m]では K₄ キャビテ ーションが 20 [mm]成長した状態にあたる. この 時、4 枚の翼における渦度の値は、約 17%の違い があり、翼面上のキャビテーションの発生状況が 翼によって異なっていることを示唆している.

 H_{sv} = 3.3 [m]においては, K₁キャビテーションが約 20 [mm]発生している状態に相当するが, 翼負圧面上の渦度の最大値が H_{sv} = 5.3 [m]のそれと比べ,約 2 倍以上増加した値となっている.

また, $H_{sv} = 2.2$ [m]では,揚程が 5%程度低下した状態に相当し,渦度の最大値は, $H_{sv} = 3.3$ [m]の時の値と比べ,約 20%程度の増加割合となっている.

さらに, *H*_{sv}=1.7 [m]では, K₁キャビテーション が翼全面にわたり成長し, 渦度の大きい領域が翼 の全面に広がっており, 渦度の値が最大値を示し ている.これに対し, 翼出口部の渦度の絶対値は, 翼入口部のそれと比べ小さいが, 有効吸込水頭 *H*_{sv} の低下につれて, 翼入口部の場合と同様に増加し ている.

しかし,翼ごとの渦度の値には大きな違いが現 れており,特に,*H_{sv}*=2.2[m]では,翼による渦度 の変化の幅が大きい.これはキャビテーションの 発達状況が翼によって大きく異なり,翼後方にお けるキャビテーションの挙動が時間的に大きく変 動しており,その非定常性が強く現れているもの と考えられる.







Fig.15 The maximum of vorticity on suction side due to changes in NPSH ($Q=2.1 \text{ [m}^3/\text{min]}$)

5. 結 言

本報では軸流ポンプに発生するキャビテーショ ンを対象に、羽根車ケーシング壁面の圧力変動お よび振動加速度等を測定し、そのウェーブレット 解析を行い、キャビテーション発生状態とあわせ て検討した.

その結果,明らかになった点は,以下のとおり である.

(1) キャビテーションの成長により,空間的およ び時間的に圧力変動波形の変化が見られ,羽根車 部の流れ方向の異なる位置により,キャビテーシ ョン発生の検知と,その挙動の予測が可能である ことを明らかにした.

(2) 圧力変動波形のウェーブレット解析によって,

チップクリアランス部に発生する K₄ キャビテー ションの初生時に特徴的な変動波形が現れ,その 波形は 4 [kHz]付近に顕著な周波数成分を有する ことを示した.

(3) ケーシングの振動波形のウェーブレット解析 から、キャビテーションの初生時に4[kHz]近辺の 周波数成分が増加し、さらに K₁キャビテーション の発生によりこの周波数域の成分がより顕著にな る.

(4) ケーシングの振動および音圧レベルは,強い 相関関係にあり,チップクリアランスのキャビテ ーションの初生時に急増し,さらに有効吸込水頭

(NPSH)の低下に伴うキャビテーションの成長 により増加する傾向を示す.

最後に本研究を実施するにあたり,ウェーブレ ット解析ソフトに関しては,早稲田大学基幹理工 学部の太田有教授よりご教示頂いた.ここに深く 感謝の意を表する.

文 献

- (1) 斉藤, ポンプのキャビテーション損傷, 日本機 械学会 流体工学部門 No.09-102 講習会教材 「水力機械に発生する非定常現象」(2009-10), pp.31-46.
- (2) 朝倉,長谷川,菊山,野村,キャビテーション 発生時の遠心ポンプ羽根車出口流れの研究,日本機械学会論文集(B編),66巻647号(2000-7), 論文 No.00-0012, pp.1765-1771.
- 論文 No.00-0012, pp.1765 -1771.
 (3) 堀江,大島,斜流ポンプのキャビテーションに 関する実験的研究,機論,29-201,(昭38), pp. 868-877.
 (4) 大島,軸流ポンプの性能改善に関する研究,機
- (4) 大島, 軸流ポンプの性能改善に関する研究, 機 論, 30-210, (昭 39-2), pp. 236-244.
- (5) Sumio SAITO, et al., A study on the relationship between impeller loading distribution and cavitation inception, International Symposium on Cavitation Inception, 1999 Joint ASME/JSME Fluid Engineering Conference, July 18-23, 1999, San francisco, CA, FEDSM99-7304.
- (6) 斉藤, 軸流ポンプのキャビテーション発生状況 と羽根車前後の流動状態, 日本機械学会論文集 (B編),53巻492号(昭62-8),論文No.86-1250A, pp.2483-2491.
- (7) 斉藤, 軸流ポンプのキャビテーション発生状況 と流速および圧力変動,日本機械学会論文集(B 編),53 巻 496 号(昭 62-12),論文 No.86-1485A, pp.3682 -3690.
- (8) 斉藤,キャビテーション騒音の発生機構とその 伝播過程の検討,日本機械学会論文集(B編), 54巻501号(昭63-5),論文No.86-1486A, pp.1095 -1103.
- (9) 榊原, ウェーブレットビギナーズガイド, 東京 電機大学出版, (1995-5), pp.2-24.
- (10) SCRYU/Tetra for Windows Version 8, Software Cradle Co., http://www.cradle.co.jp,(2011).
- (11) SolidWorks 2009, SolidWorks Japan K.K., http://www.solidworks.co.jp/, (2011).

水撃ポンプの性能に及ぼす圧力タンク内空気量の影響と 弁室内流れの挙動

斉藤純夫*, 高橋正旭**, 永田佳未***, 岩村拓哉**, 出嶌京太****, 山科貴裕*****, 土方我久**

Effects of the Air Volume in Air Chamber on Water Hammer Pump Performance and Flow Behavior in the Valve Chamber

Sumio SAITO, Masaaki TAKAHASHI, Yoshimi NAGATA, Takuya IWAMURA Keita DEJIMA, Takahiro YAMASHINA, Gaku HIJIKATA

Water hammer pumps can effectively use the water hammer phenomenon in long-distance pipeline networks that include pumps and allow fluid transport without drive sources, such as electric motors. The results of experiments that examined the effect of the geometric form of water hammer pumps by considering their major dimensions have been reported. However, these conventional studies have not fully evaluated the pump performance in terms of pump head and flow rate, common measures indicating the performance of pumps. The previous paper experimentally examined how the hydrodynamic characteristics were affected by the inner diameter ratio of the drive and lifting pipes, the form of the air chamber, and the angle of the drive pipe. This paper proposes the effect of air volume in air chamber that affects the hydrodynamic characteristics and operation conditions of the water hammer pump. It also clarifies the behavior of flow in the valve chamber during water hammer pump operation.

Keywords : Water Hammer Pump, Fluid Transients, Performance, Pressure Fluctuation, Velocity Fluctuation, Flow Visualization

1. 緒 言

近年、地球温暖化や砂漠化などの問題がクロー ズアップされ、世界的な観点から環境保全の重要 性が叫ばれている。また、エネルギーや生活関連 技術の分野においては、各種の流体機械がその社 会的基盤の役割を担っており、今後もより一層、 省エネルギー、省資源型の機械が求められている。

ポンプを含む流体管路網で問題となる水撃現 象を逆に有効利用し、かつ、電動機等の駆動源を 必要とせずに送水可能な水撃ポンプについては, 社会的基盤整備が十分でない地域においても有効 な流体輸送手段として活用できるものと考えられ る。

従来の研究では,教材用に主眼をおいて形状提 案したもの^{(1)~(3)}、また、水撃ポンプの幾何学的形 状について主要諸元の影響を検討した実験結果⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾や、さらに,水撃現象を特性曲線法により数値 解析し、実験結果と比較した論文⁽⁶⁾も公表されて いるが、どの文献においても,一般的にポンプ性 能を表す揚程と流量との関係についての評価が十 分とはいえない。

これらの状況を踏まえ、前報⁽⁷⁾では水撃ポンプ の性能を一般的なターボ形ポンプの特性との対比 で把握するための第一段階として、水撃ポンプの 代表的な幾何学的形状因子と考えられる入力管と 揚水管の内径比、圧力タンク形状および入力管傾 斜角度が、基本的な流体力学的特性に及ぼす影響 について実験的に検討した。

そこで、本報では、水撃ポンプの特性に影響を 及ぼす弁室および圧力タンクまわりの流れの挙動 を解明することを主眼に、圧力タンク内空気量の 大小による弁室および圧力タンク内の圧力の時間 的変化と水撃ポンプの性能との関連について検討 し、あわせて水撃ポンプ作動時の弁室内の流速分 布と流れの挙動についても可視化手法等を適用し て明らかにした。

2. おもな記号

A_l	: 揚水弁の弁座部開口面積	$[mm^2]$
С	:水擊回数	[count/min]
D	: 入力管内径	$[mm \phi]$
d	: 揚水管内径	$[mm \phi]$
H	: 落差	[m]
h	: 揚程	[m]
L	:入力管長さ	[m]
ℓ_s	: ばね長さ	[mm]
P_a	: 圧力タンク内圧力	[kPa]
P_{v}	: 弁室内圧力	[kPa]
Q_d	: 排水量	$[\ell/min]$

*東京工業高等専門学校 機械工学科 **東京工業高等専門学校 専攻科 ***ヤマハモーターエンジニアリング(株) ****長岡技術科学大学 ****東京工業大学
Q_i	:入力量	[ℓ/min]
Q_u	: 揚水量	$[\ell/min]$
ΔT	:水擊発生周期	[sec]
Δt	: 揚水時圧力保持時間	[sec]
V	: 圧力タンクの容積	[ℓ]
V_a	: 圧力タンク内空気量	[ℓ]
θ	:入力管傾斜角度	[°]
η	: ポンプ効率 (式(1)参照)	[%]
η_v	: 体積効率 (式(1)参照)	[%]

添字

peak: 圧力波形の最高値

3. 実験装置および実験方法

3・1 実験装置 Fig.1 は本実験に用いた水撃 ポンプ装置の全体図を、また Fig.2 は弁室および 圧カタンクまわりを含む水撃ポンプ本体の詳細図 を示す。主要機器は水槽(1)からばね(8)までの部品 で構成されている。

水槽(1)から弁室(3)へ水を供給する入力管(2)は、 アクリル樹脂素材を用いることで内部流れの可視 化が可能である。また、弁室(3)と圧力タンク(6) もアクリル樹脂素材で製作した。さらに弁室(3) の壁面には、流速測定用の電磁流速計を取り付け









られる座を設け、また、弁室内の流れを可視化す るため、インクを注入できる構造とした。

水撃作用を発生させるためには排水弁を開放 して、入力管からの流入が起こるようにすること が必要なため、排水弁(4)の下流側にばね(8)(ばね 長さ ℓ_s =46.7[mm])を取り付け、排水弁を開放す る際の補助する役割を持たせた。

3・2 実験条件および幾何学的形状因子

水撃ポンプの流体力学的特性に影響を与える因子 を Table 1 に示す。今回は特に圧力タンク内空気量が 水撃ポンプの性能に及ぼす影響について検討するた め、入力管内径は D=25[mmφ]、揚水管内径は d=18 [mmφ]とし、4 段階に圧力タンク内の空気量を変えて 実験を行った。

また、入力管長さは *L*=4[m]とし、入力管傾斜角度 については、*θ*=7[°]に設定した。水槽(1)から弁室(3) までの水位である落差は、*H*=0.5[m]で一定とした。

Table 1 Experimental factors of water hammer pump

Geometrical form fa	Experimental condition	
Drive pipe inner diameter	$D \left[\operatorname{mm} \phi \right]$	25
Drive pipe length	<i>L</i> [m]	4
Drive pipe angle	θ[°]	7
Lift valve opening area	A_l [mm ²]	254
Lift pipe inner diameter	$d [\mathrm{mm}\phi]$	18
Air chamber capacity	$V[\ell]$	3.85 (Spherical type)
Air quantity of air chamber	$V_a[\ell]$	0,0.356,1.94,3.76
Spring length	$\ell_s[mm]$	46.7
Spring constant	<i>k</i> [N/mm]	0.122
Water level	<i>H</i> [m]	0.5

3・3 実験方法 水撃は、弁室(3)の下流側に 取り付けた排水弁(4)を閉止させることにより発 生させ、その結果、揚水弁(5)の弁座部に開けた 穴径 6[mm]の9個の穴 (*A*=254[mm²]) を介して揚 水を行うことができる。

水撃ポンプに流入する入力量 Q_i は、水槽(1)の 水位を一定に保ち、水槽(1)に注水する流量を測 定することにより求めた。また、測定すべき揚程 になるよう揚水管出口部高さを設定し、その箇所 から流出する揚水量 Q_u を重量法により測定した。 さらに、排水弁から流出する排水量 Q_d も直接、 重量法により測定した。 水撃ポンプの性能については、一般的なター ボ形ポンプの性能表示にならい、揚水量 Q_u と揚 程 h との関係について表す。また、ポンプ効率 η は、水撃ポンプの入力量と出力量を考慮して次式 により算出した ^{(7) (8)}。

$$\eta = \frac{Q_u \times h}{Q_i \times H} = \frac{Q_u}{Q_d + Q_u} \times \frac{h}{H}$$
$$= \eta_v \times \frac{h}{H} \quad [\%] \quad (1)$$

ここで、 $\eta_v (= Q_u / (Q_d + Q_u))$ は体積効率を示す.

水撃ポンプの流体力学的挙動を解明するため、 Fig.2 に示す弁室(3)内の圧力 P_vと圧力タンク(6)内 の流体部分の圧力 P_aの時間的変化を歪ゲージ式 圧力変換器 (PGM-1KG、共和電業製)を用いて検 出し、増幅器と AD 変換器を介して測定した。

また、弁室内の流れの挙動を把握するため、 入力管から流入する流れ方向の流速v_xとそれに直 角の揚水方向の流速v_yの二方向の測定が可能な電 磁流速計(VM-801H、ケネック製)を弁室部の垂 直方向の中心位置で、かつ揚水弁の中心位置にセ ンサ部分がくるよう設定して測定した。

また、弁室内の流れの挙動は、弁室上流部よ りインクを注入し、内部流れを可視化して観察し た。

実験結果および考察

4・1 圧力タンク内空気量による水撃ポンプ性 能の変化 Fig.3は4段階の圧力タンク内空気量 *V_a*=0、0.356、1.94、3.76[ℓ]について実験した時 の水撃ポンプの性能を示す。第一象限に、ターボ 形ポンプの場合と同様に揚程 h と揚水量 *Q_u*の関 係を実線で、効率 η と揚水量 *Q_u*の関係を破線で表 す。また、水撃ポンプ固有の性能として、第二象 限には揚程 h と水撃回数 C との関係を、第四象限 には揚水量 *Q_u* と排水量 *Q_d*の関係を示した。

第一象限の揚程 h と揚水量 Q_u の関係をみると、 一般的なポンプ性能と同様、右下りの曲線を示し ている。この時, 圧力タンク内空気量 V_a が多いほ どその傾きは小さく、 V_a が少ないほどその傾き は逆に大きくなることがわかる。



Fig.3 Change in water hammer pump performance due to air volume in air chamber

効率 η と揚水量 Q_u の関係については、 $V_a=0[\ell]$ 以外は右上りの曲線となり、圧力タンク内空気 量 V_a が多いほど高い効率値を示している。

第四象限の揚水量 Q_u と排水量 Q_d の関係をみる と、 $V_a=0[\ell]$ 時のみ、揚水量の増加に伴い排水量 も増加するのに対し、圧力タンク内空気量が多く なるにつれて、排水量は減少し、かつ、揚水量 Q_u によらずほぼ一定の値となっている。

また、第二象限に示した結果より、水撃回数 *C* は、揚程 *h* によらず、ほぼ 40[count/min]付近で変 化している。

4・2 水撃ポンプの弁室内および圧カタンク 内圧カの時間的変化

4・2・1 水撃ポンプの作動原理 Fig.4 は一例として、 V_a=1.94[ℓ]の場合について、揚程 h=2[m]における水撃ポンプ作動時の挙動を 0.1[sec]ごとに 1.5[sec]間観察したもののうち、 Fig.5 に図示した水撃ポンプ作動時の挙動を表す フェーズ[1]からフェーズ[4]までの四つの状態に 対応する弁室内流れの可視化写真を抽出したもの である。

弁室内に見られる緑色の筋状のものは、弁室 上流より注入した流れの観察用インクである。

フェーズ[1] は 0.1[sec]時の流れ状態を示し、 排水弁は開口しており、水槽(1)からの入力水が 弁室内に流入している。

次に、フェーズ[2] にあたる 0.7[sec]時におい て、排水弁が閉止することにより水撃が発生し、



Fig.5 Water hammer pump operation

それによる圧力により破線で示した揚水弁が開口 し始めている。

フェーズ[3] の状態は、揚水弁が最も開口して いる 0.8[sec]時から揚水弁閉止直前の 0.9[sec]時ま での流れの挙動を示している。

さらに、フェーズ[4]にあたる 1.0[sec]時におい ては、揚水弁の閉止と排水弁の開口がほぼ同時に 起こっていることが観察できる。

Fig.6 は Fig.4 と同じ条件下で、弁室部の中心位 置において電磁流速計を用いて測定した流れ方向 の流速 v_xと揚水方向の流速 v_yと、両者を考慮した 絶対流速の時間的変化を示したものである。

フェーズ[1]においては v_xが徐々に減少し、排水 弁が閉止したフェーズ[2]の状態からわずかな時 間遅れで v_yが急増し、揚水されていることがわか る。さらに、揚水弁が開口しているフェーズ[3]を



経過し、揚水弁が閉止するフェーズ[4]においては、 v_v が減少している。

4・2・2 空気量*V_a*の変化による弁室内および **圧力タンク内圧力の変化と弁室まわりの流れの 可視化** Fig.7(a)(b)は揚程 *h*=2[m]において、圧 カタンク内空気量 *V_a*の変化による弁室内および 圧力タンク内圧力の時間的変化を示したものであ る。

Fig.7(a)の弁室内圧力は、圧力タンク内が満水 した状態である $V_a=0[\ell]$ では極めて尖った波形を 示すが、空気量 V_a の増加につれて圧力のピーク値 が減少し、かつ、フェーズ[3]における揚水時の圧 力保持時間 Δt は長くなる。

次に、Fig.7(b)の圧力タンク内圧力の時間的変 化をみると、圧力タンク内空気量が多いほど *P_{a,peak}*発生後の圧力の減少は小さくなっている。

これに対し、*V_a*=0[ℓ]では圧力の変動が最も大きい特異的な波形を示し、*P_{a.peak}*の発生後に圧力が急激に減少して負圧となる。この時の弁室内の流れの挙動を観察すると、圧力タンク内の圧力が*P_{a.peak}*時から急降下し、上昇に転じるまでの間、 揚水弁が開いており、圧力タンク内に水が流入していることがわかる。



4・2・3 弁室内圧力の挙動に及ぼす圧力タン ク内空気量の影響前項での結果を含め、 Fig.8は弁室内圧力*P*_vの最高圧力*P*_{v,peak}に及ぼす圧 カタンク内空気量の影響について、揚程をパラメ ータとして示したものである。

Fig.8 の弁室内圧力の最高値 $P_{v,peak}$ は、揚程の 小さい h=1[m]および h=2[m]では、圧力タンク内 空気量 V_a が増加するにつれて大きく減少する傾 向を示し、特に、 $V_a=0.356[\ell]$ のようにわずかな空 気量が存在するだけで、最高圧力値が急激に減少 している。

一方、揚程が大きい *h*=3[m]および *h*=4[m]の場
 合は、空気量の大小によらず、ほぼ同じ *P_{v.peak}* 値
 を示している。



Fig.8 Relationship between peak pressure $P_{v,peak}$ in valve chamber and the air volume V_a in air chamber

5. 結 言

水撃ポンプの作動状態に影響を与える弁室まわ りの流れの挙動を解明するため、圧力タンク内空 気量の大小による弁室および圧力タンク内圧力の 時間的変化と水撃ポンプの性能との関連について 検討を加えた。

その結果、明らかになった点は以下のとおりで ある。

 (1) 圧力タンク内空気量 Va を変化させた場合、 Va が多いほど揚程-流量特性曲線の傾きは小さく、 逆に Va が少ないほどその傾きは大きくなる。

ポンプ効率 η については、 V_a が多いほど効率値 η は増加する。

(2) 弁室内および圧力タンク内圧力のそれぞれ については、揚程の大きさによって圧力のピーク 値に違いが現われるが、基本的には揚程の大小に よらず、フェーズ[1]から[4]までの水撃ポンプ作 動時の特徴的な四つの挙動を繰り返す。 (3) 水撃ポンプの一連の動作サイクルにおける 弁室内の流速の挙動については、揚程の大小によ らず、不規則性の強い流れ状態となっている。し かし、この流れの挙動は、水源として一定の水位 を保った水槽から水撃ポンプの弁室に水が流入す る状態であるフェーズ[1]において、入力管を流 れる流れ方向の流速v_xが徐々に増加し、排水弁が 急閉止した状態にあたるフェーズ[2]の直後に急 減し、この時、揚水弁の開口に伴い、揚水方向の 流速v_vが瞬時に増加するという様相を示す。

(4) 弁室内圧力の最高値 *P_{v,peak}* は、圧力タンク
 内空気量 *V_a* が増加するにつれて減少する傾向を
 示し、揚程の小さいほどその変化が顕著である。

文 献

- (1) 鏡・出井・牛山, 水撃ポンプ製作ガイドブック, (2001), p.47,パワー社.
- (2) 柚木,水撃ポンプの製作と特性に関する研究, 科学教育研究, Vol.28, No.2 (2004), pp.94-100.
- (3) Abi Awoke Tessema, Hydraulic Ram Pump System Design and Application, Proceedings ESME 5th Annual Conference on Manufacturing and Process Industry, 2000-9, pp.1-8.
- (4) 長谷川・末廣・山口,水撃ポンプの試作と特
 性,豊田工業高等専門学校研究紀要,第17号,
 (1984), pp.15-20.
- (5) Teferi Taye, Hydraulic Ram Pump, Journal of the ESME, Vol. II, No.1(1998-7), pp.1-11.
- (6) 岡田・上月・竹中,水撃ポンプに関する研究 (第1報 水撃ポンプの数学モデル),ターボ 機械,10-6 (1982), pp.323-334.
- (7) 斉藤・他4名,水撃ポンプの幾何学的形状と 流体力学的特性との関係,日本機械学会論文集 (B編),76-767 (2010-7)、pp.1028-1034.
- (8) 斉藤・髙橋・永田,水撃ポンプの特性に及ぼ す排水弁まわりの幾何学的形状因子の影響,ター ボ機械, 39-6 (2011), pp.323-331.

(平成23年12月21日 受理)

光合成を利用した生物燃料電池の試作と動作

角田 陽*

Prototyping of Photosynthetic Bio Fuel Cell by using Purple Photosynthetic Bacteria Akira KAKUTA

It is necessary to advance the solution of environmental problems such as global warming etc. There is an attempt that applies the photosynthesis of the plant to the power generation function as bio-fuel cell. That cell is possible to become the one of solutions of the environmental problems. This study was tried to make the fuel cell which generated the electricity by the photosynthesis of the purple photosynthetic bacteria. The power performance was clarified by the experiment. This study aims to obtain a basic finding for the practical use of a bio fuel cell.

Keywords : Bio fuel cell, Purple photosynthetic bacteria, Photosynthesis

1. はじめに

地球温暖化,オゾンホール,酸性雨,異常気象 などの,全地球レベルの環境問題の解決は世界的 規模の最重要課題の一つとなっている.その解決 には,地域レベルを超えて,地球全体における持 続可能性を保持しつつ,資源やエネルギーなどを 利用していく循環型社会の構築が必要といえる. 工学的アプローチからは,省エネルギーやゼロ・ エミッションといった観点からの解決手法が見込 まれる.

エネルギー源については、太陽光、風力、地熱 などの環境を悪化させない自然エネルギー源を小 型、自律分散型のネットワークとして構築する、 従来にない新しい形態のエネルギー供給システム が提案されている.

そうした中で,植物が行う光合成による発電機 能をバイオ燃料電池として応用する試みがなされ ている.バイオ燃料電池とは,ある生物に対して, 特別な処置なしに通常状態において排出する物質 や光合成により生成された物質の化学エネルギー を,微生物などの生体触媒あるいは生物由来の酵 素などを利用して電気エネルギーに変換するシス テムである.バイオ燃料電池は生物の生体反応を 利用し、高価な金属触媒も利用しないので、一般 的に環境負荷が少なく、持続可能な自然エネルギ 一源となる、環境問題の解決手法のひとつになり うると考えられる.

そこで本研究では、我々の身近に一般的に存在 し、その扱いも簡便かつ容易にできる、紅色光合 成細菌(Purple Photosynthetic Bacteria)を 用い、その光合成機能を利用するバイオ燃料電池 に着目した.

現段階でこのバイオ燃料電池は、研究レベルと してはその機能が実証されているものの、実用レ ベルに達しているものはない.すなわち、例えば 発生電流がµA オーダにとどまっていたり、発電 持続時間が短いといった解決すべき多くの課題が ある.

そこで本研究では、実際に紅色光合成細菌を利 用した電池機構を試作作製し、その発電性能を発 電実験により明らかにすることで、バイオ燃料電 池の実用化を見据えた、高性能化のための基礎的 な知見を得ることを目的とする.

- 2. 紅色光合成細菌の概要
- 2.1 概要

光合成細菌は,光合成を行う真正細菌である. 本研究で用いた紅色光合成細菌の光学顕微鏡観察 の一例を図1に示す.一つの細菌の大きさは,お およそ数μm 程度である.同細菌は海の磯などで 容易に発見・採取することができる.人間には無 害な生物で,環境負荷も少なく,人工的な培養も 容易である.

2.2 培養方法

本研究で培養に用いた PYS 培地の成分を表1 に示す.

本研究で用いた培養方法は以下のとおりである.

- 1)蓋付試験管(φ18mm,高さ 80mm)に培地
 25ml を注ぎ、オートクレーブ(120℃、
 20min)で殺菌処理を行う.
- 2) 培地が十分に冷めた後,紅色光合成細菌 10µl をマイクロピペットにて植菌する.
- 試験管を水温 30℃の水槽に設置し、100W の白熱電球灯の点灯下にて培養を行う.

3. 光合成型バイオ燃料電池の発電原理

本研究で用いた,紅色光合成細菌の光合成型燃料電池の発電原理の概要を図2に示す.

- アノード側に挿入された細菌が光を受ける ことで光合成を行う.このとき発生する電子 が酸化還元電位の差によりメディエータに 奪い取られ,電極へと渡され,外部回路を通 ってカソード側へと到達する.
- 2)この際、外部に対して電子が仕事を行うことで電流が発生する.また、電子と同時に発生した水素は濃度勾配によりイオン交換膜(固体高分子膜(Nafion 膜))を透過する.
- 3) 最終的に,カソード側へと到達した電子と 水素,あらかじめ挿入されていた酸素による 反応で水が生成される.

4. 燃料電池機構の概要

本研究において実際に作製した電池機構を図 3 に、各部品の材料、大きさおよび加工方法を表 2 に示す.先行研究 Dを参考にした電池構造とし、 先行研究がアノード部で用いているカーボンクロ スおよび集電体の部分を、本研究では金属に変え た.このアノード側のチャンバに細菌が挿入され る.

電極用金属には、導電率の異なる、アルミニウム、鉄、チタン、銅の4種類の電極を用意し、水素透過用のφ1mmの穴をボール盤により25個あけた.電極の表面形状を変化させるために355nm波長のピコ秒パルスレーザにより深さ約1μmの溝をピッチ20および40μmで表面に加工して付加した.レーザ加工条件はいずれも出力1.6W、走査速度10mm/s、繰り返し走査回数4回とした.



Fig. 1 Purple photosynthetic bacteria on Si wafer observed with optical microscope

Table 1 Composition of culture medium

Chemicals	Concentration (weight / volume %)
Polypepton	0.5
Yeast extract	0.1
Sodium succinate	0.5
Basal salt solution	1.0



Fig. 2 Power generation principle of photosynthetic bio fuel cell



Fig. 3 Appearance of photosynthetic bio fuel cell

Parts	Material	Size [mm]	Method
Cover	Acryl	50 x 50 x 5	Cutting by band saw and drilling by drilling machine
Chamber	O-ring (silicone rubber)	Diameter; 24 Thickness; 4	Commercial product
MEA (Membrane - Electrode - Assembly)	Cu, Fe, Al, Ti Nafion Carbon cloth	Metals; 40 x 50 Solid high-polymer film; 40 x 40 Carbon cloth; 35 x 35	Crimping metals, solid high-polymer film and carbon-cloth by hot-press (140 degree, 50 kgf/cm ² , 2min.)
Current collector	Cu		Cutting by wire-cut-EDM

Table 2 Specification and production methods of fuel cell parts



Fig. 4 Photo of photosynthetic bio fuel cell

電池のアノード側チャンバに紅色光合成細菌を約1.4mlと、メディエータとしてメチレンブルー

を 0.1ml 挿入した. なお, 紅色光合成細菌は好気 的条件下では光合成を行わないことから, チャン バ内は必ず細菌およびメチレンブルーにより満た す. カソード側には大気を導入した.

図5に示す回路となるよう電池を接続した.細 菌に光合成を行わせるための光源として,分光分 布が太陽光と近い LED 電球一つを使用して,照 度が約 30000lux となるよう,電池に向かって光 を照射した.この状態で,約 15 秒ごとに電圧と 電流の値を,それぞれデジタルボルトメータおよ びピコアンメータにより測定し,発電開始から 24 時間のデータを PC に転送して記録した.なお, 実験環境は 26℃で一定とした.

^{5.} 実験方法



Fig. 5 Connection diagram of performance evaluation system



(a) No processing on electrode





6. 実験結果

発電実験により得られた電圧と時間の関係を図 6に示す.チタン以外の金属ではカーボンクロス を電極として使用した電池と比較し2倍以上の電 圧が得られた.特にアルミニウム電極においては 最大で約64mVの電圧が得られた.

また、電極に使用した金属ごとにそれぞれ異な

った特徴を持つ発電経過を示した.銅電極においては無加工のものが最も出力が高く,溝ピッチが20µm,40µmの順に最大電圧が減少したが,鉄とアルミについては前後に位相がずれたような発電経過を示した.

また、金属を電極に使用するとカーボンクロス を電極に使用したものと比較し、発電実験の再現 性にも改善が見られた.

7. 考察

カーボンクロスを電極とした電池と比較して, 金属を電極に利用した電池の方が高出力を得られ た理由として次のことが考えられる.

- カーボンクロスと比較し金属の方が導電率が 高い.(銅が約 60 倍,アルミニウムが約 38 倍,鉄が約 10 倍.)
- 2)外部回路接続用集電体を使用しなくなったことによる内部抵抗の減少.

一方で、アルミニウムより導電率が高い銅を電 極に使用した電池においては、最大電圧が鉄と同 程度になった.この理由としては、培地中に溶け 出した銅が細菌に悪影響を与えたことが考えられ る.

8. まとめ

紅色光合成細菌の光合成を利用するバイオ燃料 電池について,実際に紅色光合成細菌を利用した 電池機構を試作作製し,その発電性能を発電実験 により調べた.電極がアルミニウムで、表面にピ ッチ 20μmの溝加工をした場合に,最も発電量が 増加した.

紅色光合成細菌の培養等は首都大学東京大学院 の吉田真先生にご協力頂いた.また,実験は東京 高専の矢野弘樹君が卒業研究として実施した.記 して謝意を表す.本研究の一部は,東京高専にお ける重点配分経費によって行われた.

参考文献

- T. Moriuchi, K. Morishima, Y. Furukawa: Evaluation of Bacteria Compatible Microporous Surfaces for Biofuel Cells, Annals of the CIRP, 57(1), pp. 571-571, 2008
- M. Rosenbaum, Z. He, L. T Angenent: Light energy to bioelectricity, Current Opinion in Biotechnology, 21(3), pp. 259-264, 2010

東京高専におけるマイクロメカトロニクスの新展開 - 第3報、マイクロ加工の適用 --

角田 陽*, 多羅尾進*, 齊藤浩一*, 堤 博貴*, 志村 穣*

New Twist for Micromechatronics in Tokyo KOSEN - 3rd Report, Applying to Micro machining -

> Akira KAKUTA, Susumu TARAO, Hirokazu SAITO, Hirotaka TSUTSUMI, Jyo SHIMURA

Micro & nano level and mechatronics are one of the important technologies in the mechanical engineering field of 21ct. This study tried to found the MEMS technology in Tokyo KOSEN. This report were investigated to be applied laser process to generating micro 3D structures like micro hole, micro line, micro concave groove and so on. Micro 3D shapes could be manufactured on the material surfaces on both a hard material such as metal and a high-polymer material such as polycarbonate.

Keywords : MEMS, Micro machining, micro structure

1. はじめに

機械要素部品のマイクロ化およびメカトロニク ス化の推進は、微小化のもたらす稼働量の減少の みならず、不要動作の減少がもたらすその要素部 品のエネルギ消費量の減少など、省エネルギ的観 点からも効果が大きい.それは、二酸化炭素排出 量の減少をはじめとする、全地球レベルでの重要 課題の解決策のひとつとして貢献をするものと期 待できる.

そうした機械部品要素のマイクロ化においては, 従来のものづくりの設計手法,製作手段の単なる 延長では対応できず,新原理,新発想のものづく りが必要となってきている.それは,従来の力学 的エネルギを利用するものづくりでは,原理的に マイクロ化に限界があるためで,物理的エネルギ や化学的エネルギを利用するものづくり技術の開 発・実用化が必須となってきた.

さらには、一般的に、ひとつの機械構造体は、 複数の機械要素部品を組み合わせ、すりあわせて 実現されているが、機械部品要素のマイクロ化に おいては、そのすりあわせ段階でのさらなる精度 向上を推進する必要がある.

そうした中で、本研究では、地域連携を視野に いれ、東京高専におけるマイクロメカトロニクス の新展開をはかってきた.機械工学分野技術(駆動 系・制御系・筐体作製系)をマイクロ化対応統合シ ステムとして構築する基礎研究の第1段階として、 第1報ではマイクロ駆動体の試作を通じて、マイ クロ化技術の顕在化をはかった.第2報では、そ れをさらに進めて、構造体としての製作ならびに 機械的特性の検証を行った.本第3報では、マイ クロ加工技術として、レーザ加工によるマイクロ 加工技術の顕在化を行った.

2. レーザ加工

マイクロメートルレベルの微小機械要素部品の 製造には、フォトリソグラフィやインプリントな ど半導体集積回路製造技術の転用応用により作製 されることが多く、数多くの研究開発がなされて いるが、創成形状の限界、プロセスの複雑さ、高 コストなどが課題となっている.

レーザ加工は、少ロット生産への適応性が高く、 一部ではレジスト材に対する直接描画などが行われている.しかし、熱などの影響からマイクロ・ ナノレベルでの任意の3次元微細形状の創成技術 は十分に確立されているとはいえない.

そこで、本研究では、355nm 波長のピコ秒レー ザにおける、上記材料などについての加工条件と 創成形状の関係を実験的に明らかにすることで、 マイクロレベルの微細加工技術確立に資する知見 を得ることを目的とする.

3. 実験装置·方法

3-1 レーザ加工の概要

本研究で使用したレーザ発信器は, COHERENT 社製 Paladin であり,仕様を表1に 示す.一般に、レーザ除去加工では、レーザ光源 の仕様の違いから,熱分解プロセス、レーザアブ レーションの2種類の加工現象がある.前者は、 レーザのエネルギが熱に変換され、材料の溶融、 蒸発により加工する.後者は、高エネルギのレー ザを瞬間的に入射し、材料の分子結合を直接的に 切断することで加工する.そのため、レーザアブ レーションでは加工部周辺への伝熱がなく、精度 の高い加工が行える¹⁾.本研究で使用するレーザ は波長が短い、高エネルギを有するもので、レー ザアブレーションによる加工が期待できる.

3-2 実験装置

図1に実験装置の構成を示す.本装置の構成は大 まかに光源,光学系,機械系に分類できる.光学 系ではビームエキスパンダや集光レンズを用いて スポット径,焦点深度を調整している.本研究で は,最小スポット径 2.17 µm,焦点深度 17.4µm (実測値)で使用した.機械系では,シャッタお よびステージの制御をパソコンにより行い,任意 のステージ移動により,任意形状を創成する.

3-3 被加工材量

表2に本研究で被加工材として使用した石英基 板上の Cr 薄膜(膜厚:70nm)および高分子材料 (ポリカーボネート)の材料特性を示す²⁾.表1, 表2から Cr においては、レーザの光子エネルギ の方が結合エネルギより大きく、レーザアブレー ションによる加工が可能であると考えられる.ま

Table 1 Specification of laser light source

波長	355nm
光子エネルギ	$3.49 eV^{*}$
最大出力	4W
繰返周波数	$80\pm1\mathrm{MHz}$
パルス幅	15ps
	*計算値



Fig. 1 Schematic diagram of laser machining apparatus

Table 2 Physical property of specimens

材料	融点	結合エネルギ	平均粗さ
Cr	1907°C	$1.61 \pm 0.22 eV$	0.075µm
ポリカーボネート	約220℃	4.62 \pm 0.21eV	0.016µm



Fig. 2 Definition of defocus dimension

た,高分子材料においては、レーザの光子エネル ギに比べ結合エネルギが約1.3倍なので、多光子 吸収を経てレーザアブレーションによる加工の可 能性があると考えられる.

3-4 実験方法

Z 方向駆動ステージを使用し, Cr 薄膜, 高分子 材料に対して焦点ずらし量を変化させて加工を行 った. 焦点ずらし量を変化させることでスポット 径を変化させ,加工形状に与える影響を調べた. 焦点ずらし量 Z の定義を図 2 に示す.

また,アッテネータ,XY 方向駆動ステージを 使用し,出力,走査速度を変化させて加工を行っ た.出力や走査速度を変化させることで照射エネ ルギ量,単位面積当たりの照射時間を変化させ, これらが加工形状に与える影響を調べた.加工溝 の評価方法を図3に示す.

4. 実験結果および考察

図4に被加工材を高分子材料とした場合における,焦点ずらし量と加工形状の関係を示す.この グラフから,盛上り部幅,加工溝幅,加工溝深さ については,焦点ずらし量Zがマイナス側に大き くなるほど細く,浅くなる傾向があることがわか る.盛上り部高さについては,Z=0µmで最小と なり,Zの正負に関係なく高さが変化することが わかった.

図5に高分子材料に対して走査速度を変化させ て加工したときの加工溝の変化をまとめたものを 示す.なお,各出力において走査速度が低速のと きに断続的な加工となったものは,図5には記載 していない.75mWでは8mm/s以上では加工が 行えなかった.図5から,出力が小さいほど幅, 深さが小さくなることがわかる.また,走査速度 が速いほど幅は細くなり,深さは深くなる傾向が 見られる.なお,盛上り部においても走査速度が 速いほど幅は細く,高さは高くなる傾向があった. しかし,75mWにおいては,深さが減少すること がわかる.これは,走査速度が速い方が除去効率 は上昇するが,75mWでは被加工材に入射される エネルギが少なく,走査速度の上昇によって加工 できなくなったと考えられる.

図6は Cr 薄膜に対して焦点ずらし量を変化さ せたときの加工形状を SEM 観察した結果である. この観察画像から, 焦点ずらし量 |Z| >>0 のと き加工部が盛上り, $Z=0\sim-50\mu$ mにおいて Cr 薄 膜は除去されることがわかった.しかし, 加工溝



Fig. 3 Evaluation of concave groove



Laser power: 100 mW

Fig. 4 Results of processing of high-polymer material at air environments of 0.25MPa









Fig. 6 SEM image of laser processing of Cr thin film

Table 3 Results of laser processing of Cr film

出力	走査速度	加工溝幅	加工溝深さ
50mW	$(1 \sim 10 \text{mm/s})$	(盛上る)	(盛上る)
100mW	$5\sim\!10$ mm/s	$1.9 \sim 2.5 \mu m$	0.53∼0.83µm
$150 \mathrm{mW}$	$6\sim\!10$ mm/s	$1.4 \sim 1.9 \mu m$	0.64 \sim 1.10 μ m
200mW	$9\sim\!10$ mm/s	$1.0 \sim 1.3 \mu m$	0.52∼0.81µm

深さは約 0.3µm あり, Cr 薄膜(膜厚:70nm)だ けでなく,基板の石英も除去された可能性がある. なお,石英のみに同条件で加工を行ったところ, 溝,盛上りは観察されなかった.よって,石英に 薄膜を付着させて加工を行うことで,石英の除去 が可能となったと考えられる.

表3にCr薄膜に対して焦点ずらし量Z=-20μm における加工形状が盛上らず,除去されたときの 出力と走査速度を示す.表から,出力,走査速度 が小さい場合は盛上ってしまい除去はできないこ とがわかった.なお,表3のすべての加工溝にお いて溝底部に長手方向の周期的な凹凸が確認され た.これは図6のZ=10~-10μm でも観察された が、Z=-20~-50µm においては観察されておらず、 ステージの位置決め精度誤差のため生じたと考え られる.

5. まとめ

高融点材料および熱可塑性の高分子材料でも本 実験条件内では、加工条件を適切に選択すれば、 マイクロメートルオーダの加工ができた.

本実験は東京高専の篠崎瑞生君が卒業研究とし て実施した.実験装置は,職業能力開発総合大学校 のご協力による.記して謝意を表す.また,本研 究の一部は,東京高専における重点配分経費によ って行われた.

参考文献

- 1) 平尾一之, 邱建栄:フェムト秒テクノロジー, 126,2006
- 2) Robert c. Weast: Handbook of Chemistry and Physics, F-219-222, 1976

受理)

ピエゾフィルムを用いたひずみの可視化と欠陥検出への応用

黒崎 茂*, 菊地 俊**, 原亜三都***, 新國広幸****

Visualization of Strain and Application to Defect Detection Using Piezoelectric Film Shigeru KUROSAKI, Shun KIKUCHI, Amito HARA, Hiroyuki NIKKUNI

The purpose of this study is to develop the sensor which shows the size of the strain in the color and to examine the possibility of the defect detection using developed sensor. Developed sensor utilized the polymer piezoelectric film. The principle of color appearance is as follow. The piezoelectric film generates voltage. The voltage is converted into a heat. The heat is converted into the color. We inserted virtual defect model on the test piece. The test specimen which put on piezoelectric film was applied cyclic load. It was found that the output voltage of piezoelectric film is proportional to the applied stress amplitude. In conclusion, the color changed by applied stress is made to correspond to the strain value and we were able to show the possibility of the defect detection by using developed sensor.

Keywords : Stress-strain Measurement, Experimental Stress Analysis, Piezoelectric Film, Experimental Mechanics, Stress Concentration, Nondestructive Inspection

1. 緒 言

近年,道路橋,建築物,水道管などの産業構造 物が耐用年数を迎え,多くの経年劣化や整備不良 によって破損事故が多発している.⁽¹⁾そのような 事故防止のための技術が,今必要とされている. その技術の一つとして,ひずみの大きさを目視で きるようにする技術がある.ひずみの可視化であ る.ひずみの大きさを目で確かめることができる ならば,早期に欠陥を検出することができ,構造 物が破損する前に部品の交換や整備を行う事がで きる.このような技術が確立されれば,社会の安 全や安心に大きく貢献することができる.

ひずみの可視化は従来,光弾性法,モアレ法な どいくつか行われてきた.⁽²⁾それらの方法は実験 室内で使用するもの,大規模な装置が必要である もの等,いくつかの制約下でしか使用出来ない. そこで,筆者等は,ひずみの大きさを色で表す簡 易的な技術を提案した⁽³⁾.すなわち,ひずみを色 で表す可視化フィルムの開発を行ってきた.この 筆者らが開発したフィルムは,簡易的に測定点に 貼付けることにより,ひずみの大きさを色変化で 定性的に示すものである.考案した可視化フィル ムの原理は,動的な繰返しひずみにより得られた ピエゾフィルムからの電圧を熱へと変換し,熱を 感温フィルムにより色的変化を生じさせる.模式 図を図1に示す.

本研究は、従来行われたこの可視化フィルムを 用いて、欠陥付近に生ずるひずみの大きさを、色 変化でとらえ、非破壊検査技術として可能かどう か試みた.すなわち、フィルムが、ひずみに対応 して色変化を生じ、内部欠陥等の検出が可能か実 験的に検証した.実験では、仮想欠陥モデルを設 定し、可視化フィルムを使うことにより、欠陥検 出が可能か試みたので報告する.



Fig.1 Developed visualizing film of strain⁽³⁾

2. 試作ひずみ可視化フィルム

2.1 可視化フィルムの構造

本研究で使用したピエゾフィルムは,高分子系 ピエゾフィルムであるポリフッ化ビニリデン(以 下略称 PVDF)フィルムである⁽⁴⁾.この PVDF フィルムから得られた電圧を,ピエゾアンプを介し てポリイミドフィルム⁽⁵⁾の電極に与える.ポリ イミドフィルムから放射された熱を感温液晶マイ クロカプセル⁽⁶⁾により色として表示する.図1 にひずみ可視化フィルムの簡略図を示す.

2.2 使用した高分子系ピエゾフィルム

PVDF フィルムは,引張や曲げによりひずみが 与えられると電圧が生じる.図2に市販のPVDF フィルムを示す.通常の市販フィルムは,電極が 両面に蒸着されている.この両面の電極が,通電 しないよう縁周辺部をアセトンで削除した.本研 究で用いた縁側の電極を除去した形状寸法を,図 3に示す.表1にPVDF フィルムの特性を示す.





Fig.2 Piezoelectric polymer film sheet.

Fig.3 Cut piece of piezoelectric polymer film sheet

	Thickness	Density	Young's modulus	Tensile strength
Unit	μm	$\times 10^3$ kg/m ³	GPa	MPa
Value	28	1.78	2	140~210

2.3 ポリイミドフィルム

本研究で使用したポリイミドフィルム⁽⁵⁾は, 左右の電極に電圧を供給することで発熱する. 使用したポリイミドフィルム写真を図4(a)に示 す. PVDF フィルムから得られた電圧を,銀電極 へ供給し発熱させる. 図4(b)に示す電極間の距 離Lによって出力温度が変化する.今回は電極 間距離10[mm],厚さは50[µm]のフィルムを使 用した.



 (a) Phot. of Polyimide film
 (b) Electrode of Polyimide film
 Fig.4 Polyimide film

2.4 感温液晶マイクロカプセルフィルム

感温液晶マイクロカプセルは,温度で色の変 わる液晶をマイクロカプセル化し,フィルムに 印刷したものである.ポリイミドフィルムの発 熱部にフィルムを貼付け,色的変化を見る.使 用した感温液晶マイクロフィルムは,29.5℃~ 36℃の間で色変化を起こす(株)日本カプセル プロダクツ製 RW-32S を使用した.使用フィル ムを図5に示す.



Fig.5 Micro capsule film

3. 実験方法

3.1 ピエゾフィルムの特性実験

実験は、電気油圧サーボ疲労試験機(容量100 kN)を使用し,繰返し負荷試験を行った.繰返し 負荷周波数は10Hzの正弦波で試験を行った.出 力電圧はオシロスコープで計測を行った.武験片 は板厚3.2mm,冷間圧延鋼板 spcc 材を使用し,ピエ ゾフィルムを貼付け、負荷実験を行った.図6(a) に使用した試験片寸法を、図6(b)にフィルムを貼 付けた試験片写真を示す.ひずみゲージは,ゲージ 長30mmのものを使用した.

3.2 試作ピエゾフィルムの可視化実験

図6の試験片に試作ひずみ可視化フィルムを貼 付け,繰返し負荷荷重をかけ可視化実験を行った. 可視化実験時の試験機と試験片の拡大図を図8に 示す.

3.3 仮想欠陥モデル

本研究では、仮想欠陥モデルとして試験片裏面 に円板状欠陥を想定し切欠き加工を施した.円板 状欠陥モデルとして以下の2種類を想定した.① 深さを一定にし、直径を変化させたモデル(直径 モデル)、②直径を一定にし、深さを変化するモデ ル(深さモデル)である.

3・3・1 直径モデル 試験片板厚(*t*), 欠陥深 さ(*a*)として a/t = 0.6 を一定とし, 試験片幅 *W* にたいして欠陥直径 *d* を, *d/w*= 0.25, 0.5 の 2 種 類とした. 図 7 (a)に直径モデルを示す.

3・3・2 深さモデル 欠陥直径 *d*=15mm (*d/W* =0.25)とし,試験片板厚 *t*に対して深さ *a を*, *a/t* =0.4, 0.6, 0.8 の 3 種類に設定した.図7(b)に深 さモデルを示す.



(a)Dimension of test specimen



(b) Photo. of piezoelectric film on a test specimen

Fig.6 Test specimen



Fig.7 Model of defect



Fig.8 Photo. of electro-hydraulic servo fatigue testing machine and piezoelectric film on a test specimen

4. 実験結果および考察

4.1 ピエゾフィルムの特性実験結果

図9に負荷した応力振幅におけるピエゾフィル ムの出力電圧とひずみゲージのひずみ値を示す. 負荷応力が大きくなるに従い,ピエゾフィルムの 出力電圧が比例して大きくなっている.同様にひ ずみゲージのひずみ値も線形的に増加している.

ピエゾフィルムから直接ポリイミドフィルムに 電極を繋げた場合,出力電圧が低く発熱しないた め,ピエゾアンプ(東京センサー製)を用いて電 圧を増幅させた.ピエゾアンプの増幅レンジが 20dBのとき,感温液晶マイクロカプセルからの 色変化が生じた.そのため可視化実験では,増幅 レンジ 20dBの設定で行うこととした.以上より, 各ひずみ値に対応して,電圧が得られる.図10 に各ひずみ値の出力電圧を示す.ピエゾフィルム からの出力電圧(V)により,ひずみ(ε)の値を知 ることができる.電圧とひずみの関係は次式のよ うになる.

$$V = k \times \varepsilon \tag{1}$$

グラフより, k = 0.0205 V/ μ strain を得ることができた.







4.2 可視化実験結果

得られたピエゾフィルムからの出力電圧を, 試 作したひずみ可視化フィルムに接続し, 感温液晶 マイクロカプセルフィルムに色として表示させる. 表2に可視化実験の色変化を示す.(Color 表示) 試験片に応力振幅が加わるにつれ, 感温液晶フィ ルムから色変化を表示させることができた. 黒か ら茶,緑,青と色変化を見ることができた. それ ぞれの色変化に対応させてひずみ値をとることが でき, 色とひずみの関係を定量的に評価すること ができた. 例えば, 感温液晶マイクロカプセルフ ィルムの色表示が,緑色であれば 232~264 μ strain のひずみが構造物に生じていると目視評 価できる. これにより,感温液晶マイクロカプセ ルフィルムの色表示から物体に生じているひずみ 値を推測することができる.

Table 2 Color changing in consequence of strain

Color								-
Strain [µstrain]	0	207	220	232	244	264	268	317
Black		Bro	wn	Gre	een	l	Blue	

4.3 仮想欠陥検出実験結果

4・3・1 直径モデル 図 11(b)に仮想欠陥の直 径を変化させた場合, ピエゾフィルムからの出力 電圧と負荷応力振幅の関係を示す.応力振幅の増 加に伴い,ピエゾフィルムからの電圧の差異を見 ることができる.図 11(a)のグラフは,一定応力 振幅(σ=41.7MPa)のときの欠陥直径の大きさ と,ピエゾフィルムからの出力電圧を示す.欠陥 がない場合と比べ,欠陥の直径が大きくなれば, より大きな出力電圧が得られている.





4・3・2 深さモデル 図 12(a)は、欠陥の深さを変化させた場合、図 12(b)で示す応力振幅 σ = 41.
7MPa の時のピエゾフィルムの出力電圧を示す.
深さによって電圧の差異を見ることができる. 図 12(b)から a/t=0.8の欠陥試験片で、はっきりとした出力電圧の違いを見ることができる.

4・3・3 試作フィルムの色変化図 表3は,欠 陥直径を変えた場合(直径モデル)の感温液晶マ イクロカプセルフィルムの色変化を示す.ここで は,直径モデルのみについて色変化図を示す.

負荷応力振幅が大きくなるにつれて,色が黒→ 茶→緑→青と変化していくのが確認できる.すな わち,ひずみが大きくなり,それに従い色変化が 現れている.ここでは,色変化を白黒表示による 濃淡で表しているために,色変化が不鮮明となっ ている.実際に振幅応力 31.3 MPa の色変化を見 ていくと,欠陥直径が広くなるに従い青の割合が 多くなっているのが確認できた.これらの色変化 の結果から試験片に,より大きなひずみが生じ欠 陥が生じていることを確認できた.

Table 3 Color change for defect (defect diameter)



5. 結 言

ピエゾフィルムを用いて, ひずみの可視化フィ ルムの試作を行った.その試作フィルムを,仮想 欠陥モデル試験片に適用し,可視化実験を行った. その結果,以下の結論が得られた.

(1) ピエゾフィルムの特性実験から,負荷振幅応 力に対してピエゾフィルムの出力電圧とひずみが 比例することがわかる.

(2) 試作ひずみ可視化フィルムを用いた可視化実 験結果から,負荷応力に対応して生じたひずみ値 と変化した色とを,対応させることができる. (3) 仮想欠陥モデルの2種類①深さモデルと②直 径モデルに,試作ひずみ可視化フィルムを適用し 可視化欠陥検出実験をおこなった.その結果,フ ィルムの色変化によりひずみ検出を行うことがで き,本実験で設定した形状の仮想欠陥範囲内で検 出が可能であることが明らかになった.

今後は、仮想欠陥形状の大きさと種類を変える ことにより実際の欠陥に近づけて、本提案手法が 実用化できるよう研究する必要がある.

謝 辞 本研究は,財団法人 JKA のオートレー ス補助金の平成 23 年度補助を受けた.記して財 団法人 JKA に対して謝意を表します.

参考文献

- 根本祐二,朽ちるインフラ,日本経済新聞社 出版社,(2011), pp38-52
- (2) James W. Dally and William F. Riley,
 Experimental Stress Analysis, McGraw –
 Hill, Inc., (1991), p.389-412
- (3) 黒崎 茂,原亜三都,吉田顕大,新國広幸 ピエゾフィルムを用いた動ひずみの可視化フ ィルムの試作,日本機械学会材料力学部門講 演会 M&M2011 カンファレンス,(2011), OS0301
- (4)(株) 東京センサ カタログ, (2000), pp4-18,
- (5) Du pont-Toray Co.,Ltd, Catalogue,(2009), p10
- (6) (株) 日本カプセルプロダクツ (オンライン),
 http://www.japancapsular.com/, (2012-1-6)

(平成24年1月6日 受理)

高分子圧電フィルムを用いた接着接合部のひずみ分布測定

志村 穣*, 有田克也**, 黒崎 茂*

Measurement of Strain Distribution on Adhesive Bonded Part using Piezoelectric Polymer Film

Jyo SHIMURA, Katsuya ARITA, Shigeru KUROSAKI

Piezoelectric Polymer films (PVDF films) have features of high output voltage, linearity for dynamic loads, and flexibility that the film geometry can be changed freely. The film is available as a sensor with neither power sources nor amplifiers. In this study, the strain distribution near adhesive interfaces is measured in the two following methods – one with PVDF films and the other with strain gauges – for comparison. In addition, FEM analysis is carried out to confirm the strain distribution at adhesive bonded part. The effect on measurement accuracy is investigated both by epoxy adhesive and conductive adhesive as glue on the joint specimen. As a result, the strain measurement method using PVDF films was also applicable in joining problem by adhesive, and it was proved that the tendency of strain distribution measured with PVDF films bonded by conductive adhesive is similar to that measured with strain gauges.

Keywords : Piezoelectric polymer film, Strain distribution, Adhesive bonding, Conductive adhesive

1. 緒言

高分子圧電フィルム(ポリフッ化ビニリデン,略 称: PVDF, 以下, PVDF フィルムと記す)は圧電性を 有するため,発生電圧が非常に大きく,電源を必要 としない。このため、 増幅アンプ不要という利点が 生じ,測定対象物のひずみを直接検知できるセンサ として活用できる。従来の PVDF フィルムを使用し たひずみ測定の研究は Lee⁽¹⁾, 勝見⁽²⁾, 黒崎⁽³⁾等が取り 組んでいる。勝見ら⁽²⁾は片面電極付フィルムを用い てフィルムの発生電位を非接触電位計により計測す ることに成功している。黒崎ら⁽³⁾は勝見ら⁽²⁾のような 非接触電位計を用いず, PVDF フィルムを応力集中 部に貼り付け、出力電圧を取り出す簡易的な方法を 提案している。本研究では,黒崎ら(3)の手法に倣い, 接着接合部付近のひずみ分布を両面電極付 PVDF フ ィルムおよびひずみゲージで測定するともに、突き 合わせ接着継手の FEM 解析を実施し、これら三者 によるひずみ分布の比較を行うことで、本手法の接 合問題への適用可能性を検証した。また, PVDF フ ィルム貼り付け用の接着剤としてエポキシ系接着剤 と導電性接着剤を取り上げ、測定精度に及ぼす影響 を調べた。

2. PVDF フィルム

2.1 PVDF フィルムの出力電圧測定

本研究で用いた負荷方式は Fig.1 に示すように, 平均荷重(*P*ave)を一定とし,荷重振幅(*P*amp)を変化さ せ,一定周期の繰り返し荷重を作用させる。その 際の PVDF フィルムの出力電圧を測定し,次節に 示すひずみ解析式により,ひずみ値に換算する。



Fig.1 Cyclic loads for strain measurement



Fig.2 PVDF film bonded on specimen

なお、PVDF フィルムの出力電圧はノイズの影響 を除去するため、フィルタ(NF 製 E-3201B)を通し てオシロスコープ(kenwood CS5450)で測定した。

2.2 PVDF フィルムによるひずみ解析

本研究で用いた両面電極付 PVDF フィルムのひ ずみ解析式は黒崎ら⁽³⁾が提案した下記を用いた。

$$V_{(\theta)} = \frac{A}{C(1+k_{t}^{2})} \left\{ f_{1(\theta)} \cdot \varepsilon_{x} + f_{2(\theta)} \cdot \varepsilon_{y} + f_{6(\theta)} \cdot \gamma_{xy} \right\}$$

$$\cdots (1)$$

$$f_{1(\theta)} = \alpha_{31} \cos^{2} \theta + \alpha_{32} \sin^{2} \theta$$

$$f_{2(\theta)} = \alpha_{31} \sin^{2} \theta + \alpha_{32} \cos^{2} \theta$$

$$f_{6(\theta)} = 2(\alpha_{31} - \alpha_{32}) \cos \theta \cdot \sin \theta$$

$$\cdots (2)$$

ただし, ε_x , ε_x , γ_{xy} は Fig.2 中の x, y 方向のひずみ成 分, C は電気容量, k_t は電気機械結合定数, A は電 極面積, θ は PVDF フィルムの貼り付け角度である。 a_{31} , a_{32} と k_t は圧電定数マトリックス e と弾性係数マ トリックス E の成分で次式のように表される。

$$\alpha_{3i} = e_{3i} - \frac{e_{33}}{E_{33}} E_{3i}$$
 (*i* = 1, 2, 6) ... (3)

 $V_{(0)} = V_1, V_{(\pi/2)} = V_2 とし、材料のポアソン比を <math>v \ge v$ すると出力電圧とひずみの関係は式(4), (5)となる。 k_x, k_y は Fig.3 に示す直線の傾きである。

$$V_1 = (F_1 - \nu \cdot F_2) \cdot \varepsilon_x = k_x \cdot \varepsilon_x \qquad \cdots \qquad (4)$$

$$V_2 = (F_2 - v \cdot F_1) \cdot \varepsilon_x = k_y \cdot \varepsilon_x \qquad \cdots \qquad (5)$$

式(4), (5)の連立方程式を*Fとk*について解くと式 (6), (7)が求まる。同様に*εとV*について解くと式(8), (9)が求まる。式中の*k_x*, *k_y*は 3.1 節に示す予備実験 で求めておく。

$$F_{1} = \frac{k_{x} + v \cdot k_{y}}{1 - v^{2}} \cdots (6) \qquad F_{2} = \frac{k_{y} + v \cdot k_{x}}{1 - v^{2}} \cdots (7)$$
$$\varepsilon_{x} = \frac{F_{1} \cdot V_{1} - F_{2} \cdot V_{2}}{F_{1}^{2} - F_{2}^{2}} \cdots (8) \quad \varepsilon_{y} = \frac{F_{1} \cdot V_{2} - F_{2} \cdot V_{1}}{F_{1}^{2} - F_{2}^{2}} \cdots (9)$$

3. 実験方法

3.1 k_x, k_vの測定

Fig.3 に示すように、アルミニウム合金の平板に 1 軸方向および 2 軸方向の PVDF フィルム(ここで は、主応力方向が 1 軸方向に一致、すなわちθ=0°) にそれぞれ 3×3[mm²]の導電テープを貼付したも のと、ひずみゲージ(共和電業、KFG-1-120-C1-11) を貼り付けた。PVDF フィルムにはアルミニウム 合金平板を介して繰り返し負荷を与え、出力電圧 の測定を行った。容量 100[kN]の電気油圧サーボ式 疲労試験機を用い、負荷周波数を 10[Hz]で固定し つつ繰り返し負荷を 0.25~1.5[kN]に変化させて測 定を行った。





Fig.4 geometry and dimensions of adhesive butt specimen



Fig.5 Photograph of joint specimen

3.2 突き合わせ接着接合試験片のひずみ測定

Fig.4 に突き合わせ接着接合試験片の寸法およ び形状を示す。試験片の材質はアルミニウム合金 A6063 であり, 接合面をサンドペーパーで研磨後, アセトンで脱脂・洗浄し、強力瞬間接着剤 (LOCTITE,高強度金属用プロユースタイプ)を塗布 して接着接合した。接着層厚さは 0.1mm であり, 試験片完成時の寸法は 560.1×50×5mm となる。接 着界面に沿って、両面電極付 PVDF フィルム (4×4mm²)をエポキシ系接着剤で貼付し、さらにそ の上に導電テープ(3×3mm²)を貼り付けることに よりそれぞれの PVDF フィルムからの出力電圧を 検出した。なお、PVDF フィルムは 1mm 間隔で6 枚配置している。接着層を挟んで PVDF フィルム と対応する位置にひずみゲージを貼付し、ひずみ 分布を測定した。Fig.5 は実際に PVDF フィルムと ひずみゲージを貼付した試験片である。

負荷荷重は平均荷重(P_{ave})を 500[N], 負荷周波数 を 10[Hz]で固定し, 荷重振幅(P_{amp})を 100[N]から 400[N]まで, 100[N]ずつ変化させて測定を行った。

4. FEM 解析方法

Fig.6 に突き合わせ接着継手の解析モデルを示す。 本解析は平面応力状態を仮定し、平面プレート要素 を用いた。また、対称性の考慮から継手の 1/4 部分 を解析対象とした。解析モデルの寸法および形状は、



Fig.6 Model for analysis of adhesive butt joint

Table	1	Material	nronerties	of	adhesive	and	adherend
Table	1	waterial	properties	01	adhesive	anu	aunerenu

\sum	Young's modulus E [GPa]	Poisson's ratio v
Acrylic adhesive	1.0	0.39
Adherend A6063	69	0.33

突き合わせ接着継手試験片のそれと対応させ、l = 280mm, w = 50mm, $t_a = 0.1$ mm とした。また、被着体 にアルミニウム合金 A6063、接着層にアクリル系瞬 間接着剤の使用を想定し、Table 1 に示す材料定数を 定義した。境界条件は、二つの対称面、x = 0 面およ びy = 0 面に対称条件を与えることでその部分の変 位を完全拘束し、Fig.6 の右端部に長手方向の引張荷 重F = 900[N]を与えるものとした。

5. 結果および考察

5.1 k_x, k_yの測定結果

Fig.7にPVDFフィルムの出力電圧とひずみゲージ よるひずみ値の関係, すなわち, Fig.3 におけるを k_x , k_y 示す。PVDF フィルムの出力電圧とひずみ値には 極めて良好な線形性が見られた。また, フィルムの 圧延方向が荷重方向に一致した出力電圧 V_1 (図中の 黒丸)において, より高い値を示している。この結 果をもとに k_x , k_y を算出したところ $k_x = 0.637$, $k_y = 0.110 [mV/ <math>\mu$ strain]となった。

5.2 突き合わせ接着接合試験片のひずみ測定結果 (1) PVDF フィルムをエポキシ系接着剤で貼付した 場合

算出した k_x, k_yおよび式(6)~(9)からひずみ値を 算出した。ここでは, ε_xの分布を Fig.8(a)に示す。 PVDF フィルムの各点のひずみ値はひずみゲージ のそれに対して小さく,ばらつきが顕著であり, 不安定な印象を受ける。また,ひずみゲージの貼 り付け作業の簡便性に比べて,エポキシ系接着剤 を用いた PVDF フィルムの貼り付けにはその塗布 量に注意しなければならないことが伺える。塗布 量が足りない場合, PVDF フィルムの貼り付けが





(a) Case where PVDF films bonded by epoxy adhesive





Fig.8 Comparison of strain distribution measured by two methods

不完全となり、出力されるべき電圧が得られない ことになる。一方で、塗布量が多過ぎると、PVDF フィルムを押し付けて接着する際に意図した貼り 付け方向に対してずれを生じ、正確な出力電圧を 測定できない可能性もある。したがって、PVDF フィルム面積に対する貼り付け接着剤の最適塗布 量を検討する必要がある。

(2) PVDF フィルムを導電性接着剤で貼付した場合

(1)の PVDF フィルムをエポキシ系接着剤で貼り 付ける場合, PVDF フィルム裏面の電極と被着体 の間に接着層が入ることになり,これが出力電圧 に影響を及ぼすものと考えられる。そこで,より 導電性の高い接着剤を用いて PVDF フィルムを貼 り付けることを試みた。Fig.8(b)に導電性接着剤を 用いて PVDF フィルムを貼付した際のひずみ分布 を示す。Fig.8(a)と同様にひずみ値は PVDF フィル ムの方が小さいが,ばらつきが少なくなり安定し, ひずみ分布の傾向が一致していることがわかる。

PVDF フィルムの方がひずみ値が小さくなる要 因としてフィルムサイズが挙げられる。今回使用 したフィルムサイズは 4×4mm² であり, 接着界面 直近から 4mm 四方の領域が測定対象となってお り、この領域のひずみが平均化されてフィルムの 出力電圧として測定される。対してひずみゲージ はグリッド長さが 1mm であり, PVDF フィルム より接着界面に近く,その分ひずみ値が大きくなる。 両者の数値的差異を改善するためにフィルムサイズ をより小さくすることが考えられるが、必然的に電 極面積も小さくなるため出力電圧も減少することに なる。以上のことから, 接着接合部付近のひずみ分 布に関して、ひずみゲージと PVDF フィルムの両者 を厳密に一致させることは現段階では難しいが、ひ ずみ分布の傾向に一致が見られることから, 補正係 数等を導入することで妥当な評価が可能になると考 えられる。

(3) FEM 解析によるひずみ分布との比較

FEM 解析結果によるひずみ分布を Fig.8 中に白抜きの三角印で記した。ひずみ値の変動は見られず, ほぼ一様なひずみ分布となっており,ひずみゲージ および PVDF フィルムのそれとは傾向が異なって いる。数値的にひずみゲージのひずみ値と近しい ことから, PVDF フィルムのそれは危険側にある と言える。

6. 結言

本研究では、黒崎ら⁽³⁾の手法に倣い、接着接合部 付近のひずみ分布を両面電極付 PVDF フィルムおよ びひずみゲージで測定し、両者の比較を行うともに、 突き合わせ接着継手の FEM 解析を実施し、これら 三者によるひずみ分布の比較を行うことで、本手法 の接合問題への適用可能性を検証した。その結果、

- 以下の結論が得られた。
- (1) 接着接合問題において、本手法によるひずみ測 定の可能性を示した。
- (2) PVDF フィルムの貼り付けに導電性接着剤を用 いることで測定精度の向上が期待できる。

謝辞

本研究の一部は平成22年度重点配分経費(個人 で科学研究費補助金申請内容を遂行するための経 費)の補助を受けた。関係者各位に記して謝意を表 する。

参考文献

- (1) Lee, C.-K., et al: J.Acoust.Soc.Am, **90**-2(1991), 945-953.
- (2) 勝見圭介,他 3 名:日本機械学会論文集 A 編, 64-617(1998),215-220.
- (3) 黒崎 茂, 他 1 名:日本機械学会論文集 A 編, 71-702(2005), 271-278.

(平成24年1月6日 受理)

地元企業技術者向け機械系工学講座の取り組み

多羅尾進¹⁾,福田勝己¹⁾,志村 穣¹⁾,藤野 宏²⁾,鎌田千詩³⁾, 大塚友彦⁴⁾,三谷知世⁵⁾,佐々木桂一⁶⁾

An Approach of Mechanical Engineering Related Course for Local Company Engineers

Susumu TARAO¹⁾, Katsumi FUKUDA¹⁾, Jyo SHIMURA¹⁾, Hiroshi FUJINO²⁾, Chiuta KAMATA³⁾, Tomohiko OHTSUKA⁴⁾, Tomoyo MITANI⁵⁾ and Keiichi SASAKI⁶⁾

An experience-based education course for regional engineers around Tokyo National College of Technology has been planned and performed in 2009. This education course program was commissioned by Hachioji city, and designed for learning basic of mechanical engineering through several themes of mechanical design and analysis. Those themes which were decided based on aiming to keep students' motivation high, include practical mechanical drawing (3DCAD and hand drawing) and practical mechanical analysis (structural analysis and motion analysis). Based on the above, this paper presents the approach, the progress and the result of the education course program.

Keywords : reeducation, experience-based education, mechanical engineering

1. はじめに

東京高専では、2009年度8~9月に掛けて、もの づくり現場を担う地元技術者向けにテクノクロス 講座を開講した.本講座では、主に本校教職員が 講義を行う形式で、本校施設を活用した実験実習 に重点をおき、機械系、電気系、化学系の3分野 に渡り各分野の基礎を中心に学ぶ内容とした.

この内,機械系については,本校機械工学科が 主体となって講座を担当した.機械系講座では, 機械の設計・解析に関する基本事項の習得に主眼 を置き,受講生がモチベーションを維持しながら 効果的に取り組めるよう,実習を主とする「手描 き機械製図」,「3DCAD」,「構造解析」および「ロ ボット工学の運動学解析」の4テーマが用意され, 本校教職員および外部講師により講義が行われた.

本報告では、テクノクロス機械系講座に関して、 その取り組み体制、実施内容、実施前および実施 後のアンケート調査とこの分析、さらに加えて、 今後の展望について述べる.

2. テクノクロス機械系講座の取り組み

対象となる受講生は,現在実際に機械に関わる 仕事に従事しながら,ここでさらに機械工学の基 礎知識を整理して身につけることを望んでいる 技術者,あるいは全くの別分野であるが機械工学 の知識が必要となっている技術者等を想定した. 表1. テクノクロス講座(機械系)の日程

講座名	3DCAD		
概要	SolidWorks を用いて3DCADおよび機械製図のCAE基礎を学習する.		
担当	外部講師(テクノブレイン):鎌田,教育研究技術センター:藤野		
講座時間	3 時間/日×3日= 9 時間		
会場	実習工場CAD・CAM室		
	研修内容	到達目標	
9/ 7AM 9/ 9AM 9/11AM	●3DCADの基礎 ・2DCADとの違い ・モデリングの基礎 ・フィーチャー分割, モデルの効率化	 3DCADを用いた機械製図の基本を 修得する。 モデリングの基礎を修得する。 	
講座名	基礎機械型図		
概要	※一般の表本について講義1. 手描き型図の演習を行う		
相当	機械表色の変革について調報で、予備で表色の演習を行う。 機械工学社・結果		
講座時間	4時間/日×1日= 4 時間		
会場	第3棟2階第2創造工房(3213室)		
	研修内容	到達目標	
9/ 7PM	 ●手描き製図の基礎 ・線種、文字、JIS規格 ・投影法、記号 ・機械製図の作成手順 	 機械製図の基本を理解する. 手描きによる機械図面 作成の基礎を習得する. 	
講座名	構造解析入門・ロボット工学入門		
概要	機械系の解析として,構造解析とロボットの運動学解析を取り扱う.		
担当	機械工学科:志村(構造解析),多羅尾(ロボット運動学解析)		
講座時間	4 時間/日×1日= 4 時間		
会場	第4棟1階第三演習室(構造解析), 第3棟2階3208室		
	研修内容	到達目標	
9/ 9PM	●構造解析入門 ・構造解析の基本、計算機を用いた演習 ●ロボット工学入門 ・運動学解析の基本、手計算による演習	 ・2次元静定問題の解析手法の基本 を理解する。 ・低自由度のリンク機構の運動学 解析の基本を理解する。 	

テクノクロス講座(機械系)の日程概要を表1 に示す.前述した通り,「3DCAD」(9時間),「手 描き機械製図」(4時間),「構造解析」(2時間) および「ロボット工学の運動学解析」(2時間)の 4テーマを用意した.「3DCAD」は学外の講師が 教育研究技術センターの支援の下で担当し,他の 3テーマについては,本校の教授,准教授,助教 が担当した.何れも学内の施設を活用した.

1)機械工学科,2)教育研究技術センター,3)テクノブレイン,4)電子工学科,5)物質工学科, 6)産業技術センター



(1) 3DCAD 入門



(2)構造解析入門

図1. テクノクロス機械系講座の様子 図1に機械系講座の実習風景を示す. 2009 年度 の機械系講座のテーマの内,「3DCAD」,「手描き 機械製図」は,同年度別に実施された東京高専の 匠塾^[1]でも取り扱われてきた機械系として重視し ているものづくりの基本となるテーマである.

一方,「構造解析」および「ロボット工学の運 動学解析」については,今回新たな試みとして用 意したテーマであり,機械の設計段階において, 必要に応じて検討が必要となる基本事項を取り扱 う内容とした.この新たな取り組みの内,以降で は「構造解析」についてやや詳細に述べる.

本テーマ「構造解析」は、簡単な「はり」モデ ルを対象とし、構造解析結果と材料力学による理 論値との比較を行うことで、 CAE の一連の流れ を把握するとともに、その評価方法を理解する内 容となっている.今回使用する解析用アプリケー ションは、3DCAD でも利用している設計ソフト ウェア SolidWorks^[2]とリンクされた COSMOS Works であり、3DCAD モデルとシームレスに連 動して機械設計および構造解析それぞれの基本が 効率良く学べるよう考慮している.



(1)3D モデリング



(2)拘束条件,荷重条件,メッシュ分割



図2.構造解析の一例(片持ちはり) この講義では、まず解析の核となる有限要素法 (FEM)について、要点が説明された後、図2に示 す流れで①SolidWorksによる3Dモデリング、② COSMOSWorksによる構造解析、③構造解析結果の 検証と理論値との比較検証という手順を踏む.



図3.要素サイズ・種類の変更例 さらに解析精度を上げる対策例として図3に示

表2. 機械系テクノクロス講座事前アンケート集計結果

次のアンケート項目について該当する番号を〇で囲んでください。

ご専門をお聞かせ下さい(最も近いものをひとつ選択して下さい)。
 [1]電気・電子系1、[2]機械系6、[3]情報系、[4]化学系1、[5]その他2
 2)本講座にお申し込みをされたきっかけは何ですか。
 [1]ホームページを見て、[2]ポスターを見て、[3]会社・知人の勧め9、
 [4]商工会議所の紹介1、[5]その他

3)本講座に期待することは何ですか(最も近いものをひとつ選択して下さい)。
[1]基礎を学び直したい 6、[2]応用を学びたい 2、[3]新分野に進出したい 1、
[4]高専の教職員と知り合いたい、[5]その他 1

4)業務で機械設計をされたご経験はありますか。
[1]全くない 3、[2]あまりない 4、[3]少しある 1、[4]頻繁に行っている 2

「3DCAD 入門」、「機械製図の基礎」に関するアンケートです。
5) 3DCAD による製図手法をご存知ですか。
[1]全く知らない 5、[2]あまり知らない 2、[3]少し知っている 1、[4]良く知っている 2

6)手描きによる製図手法をご存知ですか。[1]全く知らない 3、[2]あまり知らない 5、[3]少し知っている 1、[4]良く知っている 1

7)機械製図に関連する規格をご存知ですか。[1]全く知らない 2、[2]あまり知らない 5、[3]少し知っている 3、[4]良く知っている

「構造解析入門」に関するアンケートです。 8)構造解析の用途をご存知ですか。 [1]全く知らない 3、[2]あまり知らない 4、[3]少し知っている 3、[4]良く知っている

9)構造解析を計算機で行う手法をご存知ですか。[1]全く知らない 5、[2]あまり知らない 2、[3]少し知っている 3、[4]良く知っている

10) 3次元弾性問題の解析手法をご存知ですか。[1]全く知らない 6、[2]あまり知らない 2、[3]少し知っている 2、[4]良く知っている

「ロボット工学入門」に関するアンケートです。 11) 座標変換に行列を用いる手法をご存知ですか? [1]全く知らない 6、[2]あまり知らない 3、[3]少し知っている 1、[4]良く知っている 12) ロボットの運動学解析手法をご存知ですか? [1]全く知らない 6、[2]あまり知らない 3、[3]少し知っている 1、[4]良く知っている 【自由記述欄】 勉強させて下さい. 93

表3.機械系テクノクロス講座事後アンケート集計結果

次のアンケート項目について該当する番号を〇で囲んでください.	
1) 3DCAD の役割(2D との遅い)について埋解できましたか。 [1]今く理解できたかった 「9]ちまり理解できたかった 「9]小」理解できた 「4]自く理解できた	
[1]主く連解できながらに,[2]のより連解できながらに,[3]少し連解できた,[4]良く連解できた	
2)モデリングの3つの基礎(平面指定・スケッチ・立体化)について理解できましたか.	
[1]全く理解できなかった,[2]あまり理解できなかった,[3]少し理解できた,[4]良く理解できた	
3) 適切なフィーナヤー分割について埋解できましたか。 [1] 今ノ理敏できわかった 「0] ちまり理敏できわかった 「0] 小」理敏できた 「4] 白ノ理敏できた	
[1]主く理解できながらに、[2]めより理解できながらに、[5]少し理解できた、[4]氏く理解できた 5 2	
4) 第三角法による投影法について理解できましたか.	
[1]全く理解できなかった,[2]あまり理解できなかった,[3]少し理解できた,[4]良く理解できた	
5) 磯橛毀凶に用いる緑,又子,記号等の種類について儆要か埋解でさましたか. [1]今ノ理敏できわかった [9]たまり理敏できわかった [9]小し理敏できた [4]白ノ理敏できた	
$[1] \pm \langle \underline{\mathcal{A}} \mathbf{\mu} \langle \mathbf{\sigma} \mathbf{a} \rangle, [2] \otimes \mathbf{\sigma} \mathbf{\sigma} \mathbf{\mu} \langle \mathbf{\sigma} \mathbf{a} \rangle, [3] \neq \mathbf{O} \mathbf{\mu} \mathbf{\mu} \langle \mathbf{\sigma} \mathbf{a} \rangle, [4] \otimes \mathbf{\sigma} \mathbf{a} \in \mathbf{A}$	
6)機械製図の基本的な一通りの描き方について理解できましたか.	
[1]全く理解できなかった,[2]あまり理解できなかった,[3]少し理解できた,[4]良く理解できた	
「傳道解析人門」, 「ロホツト上子人門」に関するアングートです。 7) 構造解析の其太的た一通りの流わを理解できましたか	
7) 構造所切の基本的な、通りの通知を理解できなしたが、 [1]全く理解できなかった、[2]あまり理解できなかった、[3]少し理解できた、[4]良く理解できた	
8)解析条件(材料定義,拘束条件,荷重条件等)の意味を理解できましたか.	
[1]全く理解できなかった,[2]あまり理解できなかった,[3]少し理解できた,[4]良く理解できた	
1 2 4 0) 破垢結果の証価古法な理解できましたか	
5) 府が福木の計画力伝を連座でさましたが、 [1]全く理解できなかった、[2]あまり理解できなかった、[3]少し理解できた、[4]良く理解できた	
10)有限要素法の特長・習性を把握できましたか.	
[1]全く理解できなかった,[2]あまり理解できなかった,[3]少し理解できた,[4]良く理解できた	
1 2 4 11) CAT の方田州な認識オスことができましたか	
11) OALの有力性を範疇することができましたが、 [1]全く理解できなかった。[2]あまり理解できなかった。[3]少し理解できた。[4]良く理解できた	
$\frac{2}{4}$	
12) ベクトル,行列の計算(足し算,かけ算等)の要領が理解できましたか.	
[1]全く理解できなかった, [2]あまり理解できなかった, [3]少し理解できた, [4]良く理解できた	
1 4 2 19) 位置と次勢をベクトルと同転行列で事才亜領が理解できましたか	
[1]全く理解できなかった、[2]あまり理解できなかった、[3]少し理解できた、[4]良く理解できた	
1 4 2	
14) 同次変換行列を取り扱う要領が理解できましたか.	
[1]全く理解できなかった, [2]あまり理解できなかった, [3]少し理解できた, [4]良く理解できた	
15)1日7時間という議義時間け適切でしたか 4 2	
[1]不適切, [2]少し不適切, [3]やや適切, [4]適切	
1 6	
16)開催日数(3日間)という日数は適切でしたか.	
[1] 不適切, [2] 少し不適切, [3] やや適切, [4] 適切	
[1]不適切, [2]少し不適切, [3]やや適切, [4]適切	
1 6	
18) 講義の内容(レベル)は適切でしたか.	
[1] 不適切,[2] 少し不適切,[3] やや適切,[4] 適切	
19) 講師の教え方は適切でしたか.	
[1]不適切, [2]少し不適切, [3]やや適切, [4]適切	
20) 講義はあなたの仕事に役立ちそうですか。 [1]みく処に立たねい、「o]キキャ処に立たねい、「o]ホレ処立へ 「4]ナいに処立へ	
[1]土ヽ仅に业にない,[2]めまり仅に业にない,[3]少し佼业ン,[4]人いに佼业ン 3	
21) テキストや教材は適切でしたか.	
[1]不適切, [2]少し不適切, [3]やや適切, [4]適切	
	h
【日田記迎欄】井吊に有恵義でめつた。3日とはいえ為になつた。5日くらいがベター。楽しかつ) また受けたい。	۲.

す「要素サイズの変更」,「要素種類の変更」等 についても実際に体験しながら,その効果が習得 できるようにしている.

受講者の業務経験は様々であったが,後述の受 講者アンケートからも分かるように概ね高い満足 度を得ることが出来た.

3. 受講者アンケート調査とその分析

3.1.受講者の専門分野・業務経験について 受講者の専門分野・業務経験に関する事前アン ケートの結果を表1に示す.専門分野は機械系が 最も多い結果となっているが,40%の受講生は機 械系とは異なる分野から参加している.機械設 計・解析に関する業務経験はあまりなく,基礎的 事項を学ぶニーズが高いことが分かった.申し込 みの契機は,大半が会社・知人の勧めであった.

3.2.本講座の効果測定について

本講座の効果測定を行うため、受講前と受講後 において、本講座に関連の深い基礎知識について 受講者の理解度アンケートを調査した.前述の事 前アンケート(表1参照)に加え、表2に事後ア ンケートの結果を示す.双方のアンケートを比較 すると概ね良好の評価が得られていることが分か る.

3DCAD, 手描き製図の理解度は高い.構造解析, ロボット工学についても比較的理解度は高いと言 えるが,理解できなかったと回答している受講生 が1,2名おり今後の課題である.開催日数につい て3日間は短いという回答が散見された.内容, 教材についても良好な評価が得られている.仕事 に役立つか?という問についても良好な評価が得 られている.非常に有意義,楽しかった,また受 けたいという自由記述の回答が見られた.

4. まとめ

本報告では、地元企業技術者向けに開講したテ クノクロス講座のうち、機械系分野の講座の実施 概要について報告した.講師は外部講師と本校教 職員が担当し、本校施設を活用して9月上旬から 計3日間の講座として開講した.受講前・受講後 のアンケート調査から概ね良好の評価が得られて いることが分かった.

例えば文献^[3]では、中小企業人材育成事業とし てメカトロニクス基礎講座に関する報告がされて いるが、この講座では、組み込みシステム教育用 のロボット教材の開発も担当者自ら行っている. このような動向も踏まえながら、地域活性化、地 域若手技術者の育成に効果的な機械系講座を実施 していくことが今後の課題である.

謝辞

本講座は、八王子市委託事業として助成を受け ている.また開講・実施の際は、機械工学科およ び教育研究技術センター、並びに総務課企画係の 教職員関係各位に大きなご支援を頂いている.こ こに謝意を表す.

参考文献

- [1] 東京工業高等専門学校:匠塾, <u>http://xythos.tokyo-ct.ac.jp/dpt/tecno/t</u> <u>akumi/index.htm</u> (Accessed 2009.11.30)
- [2] ソリッドワークス・ジャパン: SolidWorks 3 次元 CAD 設計ソフトウェア, <u>http://www.solidworks.co.jp/default.htm</u> (Accessed 2009.11.30)
- [3] 幸田憲明,久間英樹,内村和弘,福岡久雄,皆尾 登志美: "「メカトロニクス基礎講座」向け 教育用ロボット",第26回日本ロボット学会 学術講演会講演予稿集 CD-ROM, AC3A1-01, 2008.

(平成24年1月6日 受理)

ナノインデンテーション法による単結晶シリコンの マルテンス硬さに及ぼす結晶面の影響

福田勝己*, 小林光男**, 角田 陽*, 高畦千翔***

Effects of Crystal Orientation on Martens Hardness of Single-Crystal Silicon in Nanoindentation Method Katsumi FUKUDA, Mitsuo KOBAYASHI, Akira KAKUTA, Chika TAKAAZE

Recently, the devices have been progress miniaturization and ultra thin in kinds of fields, especially microelectronic devices and information storage media. Therefore, their characteristics are very important in engineering. However the measurement of near-surface is very difficult. In this study, effects of crystal face on martens hardness of single-crystal silicon in Nanoindentation is investigated.

Keywords : Nanoindentation method, Martens hardness, Single-crystal silicon, Crystal orientation

1. はじめに

近年,半導体デバイスや情報集積メディア,MEMSなど 多くの分野でデバイスの微小化・極薄化が進んでいる.そ のために,微小領域や薄膜などの材料表面近傍の機械的特 性を明らかにすることは重要な課題の一つである.特に, デバイス等の基材として多用されている単結晶シリコン ウエハは結晶性材料であるために,その結晶面や結晶方位 の違いによって異なる強度を示すことが知られている¹⁾.

本研究では、試料としてミラー指数(100),(110),(111), (311)の4種類の単結晶シリコンウエハを用いて、そのマル テンス硬さをナノインデンテーション法により測定した. また、圧子を回転させることにより、結晶面や結晶方位が マルテンス硬さに及ぼす影響について総合的な見地から 明らかにした.

2. ナノインデンテーション法

2.1 ナノインデンテーション法^{2)~5)}

従来の硬さ試験では、試料の試験表面に設定荷重で圧子 を押込み、荷重を除荷した後に形成されるくぼみの対角線 長さなどの大きさを光学顕微鏡によって直接観察し、硬さ 評価を行っている.

しかし,押込み荷重が数十[gf]である従来のマイクロビ ッカース硬さ試験機では,材料の最表面や薄膜,コンピュ ータデバイスの基板などの微小な領域を評価することは 困難である.また,脆弱な材料を対象とした硬さ試験では, 押込み荷重が大きい場合に,くぼみ先端から微小なき裂 (クラック)が発生することがあり,測定に誤差が生じる. これらの問題を解決するためには,従来の硬さ試験方法に 比べて,押込み荷重をより微小にする必要がある.しかし, 押込み荷重の微小化に伴ってくぼみのサイズもより小さ くなってしまい,対角線の長さを測定することは困難にな る.

一般的にナノインデンテーション法では、押込み荷重が 10[gf]以下の場合を想定しているが、押込み荷重が微小に なると軟らかい材料を試験した場合でも、くぼみの大きさ が1[µm]以下になる場合もある.そのため、くぼみを光学 顕微鏡で直接観察して評価するには精度の面で限界があ る.そこで、ナノインデンテーション法では、圧子の押込 み荷重と押込み深さとの関係を連続的に測定して評価す る方法を採用し、硬さ評価を行っている.この方法の利点 は、設定した押込み荷重(最大押込み荷重)に到達するま での圧子の押込み荷重と押込み深さとの関係を時系列デ ータとして測定しているため、試料の深さ方向に対する硬 さ分布を知ることができる点である.また、縦弾性係数(ヤ ング率)についても、除荷の過程(除荷開始直後のほぼ弾 性的な挙動に限定される部分)における圧子の押込み荷重 と押込み深さとの関係から求めることが可能である.

このような微小な押込み荷重と微小な押込み深さとの 関係から硬さの評価を行う試験を「ナノインデンテーショ ン法(超微小押込み硬さ試験)」と呼ぶ.

2.2 マルテンス硬さ

ナノインデンテーション法では、硬さの評価のために圧 子の押込み荷重と押込み深さとの関係を連続的に測定す る. Fig.1 に押込み荷重 P と押込み深さ h との関係の一例 を示す.



Fig.1 Relationship between Normal load and Indentation depth

Fig.1 は,縦軸が圧子の押込み荷重,横軸が試料表面からの圧子の押込み深さである.また,この図から塑性変形量, 弾性変形量,弾性回復量,総変形量(最大押込み深さ量) についても知ることが可能である.

圧子を下降させ表面を検出後,一定速度で設定荷重まで 負荷する.この過程を「負荷過程」と呼ぶ.圧子の押込み 荷重の増加とともに押込み深さも増加していき,設定荷重 に到達した時点から,事前に設定された時間だけ押込み荷 重を保持する.この時間を「荷重保持時間」と呼ぶ.荷重 保持後,再び一定速度で押込み荷重がゼロの状態になるま で除荷していき,押込み荷重がゼロとなった時点で試験を 終了する.この過程を「除荷過程」と呼ぶ.また,ここで 得られた試料表面からの圧子の押込み深さが最大になっ た点を「最大押込み深さ」と呼ぶ.Fig.2に試験後のくぼみ の状態を示す.



Fig.2 Nanoindetation's model

ナノインデンテーション法により求められる硬さ値を 「マルテンス硬さ」と呼ぶ.本来,硬さHの値は便宜的に 押込み荷重Pをくぼみの表面積Sで除した商をいい,次の (2.1)式により定義されている.

$$H = \frac{P}{S} \tag{2.1}$$

ナノインデンテーション法では圧子の押込み荷重と押 込み深さを連続的に測定するため、くぼみの表面積はこの 圧子の押込み深さから算出することになる.

くぼみの表面積はこの圧子の幾何学形状から理論的に 定義することができる.ナノインデンテーション法で使用 する三角すい(ベルコビッチ)圧子の場合,稜間角度が 115[deg]であるため,くぼみの表面積 S は設定荷重(最大 押込み荷重)の負荷時における圧子の押込み深さ h から, 次の(2.2)式のように定義される.

$$S = 26.43h^2$$
 (2.2)

(2.1)式に(2.2)式を代入することにより、次の(2.3)式が得られる.

$$H = HM = \frac{P}{26.43h^2}$$
(2.3)

ここで*HM*:マルテンス硬さ[N/mm²], *P*:押込み荷重[N], *h*:押込み深さ[mm]である.

これより、マルテンス硬さ値はくぼみの表面積から圧子 の押込み深さを除して算出することができる.つまり、硬 さの値を求める場合には、圧子の押込み深さをいかに正確 に測定するか、また、圧子の押込み深さからくぼみの表面 積をいかに正確に算出するかが重要である.

本研究では、(2.3)式によって求められる硬さ値をマルテ ンス硬さ (Martens Hardness : *HM*) として評価することに した.

3. 試験

3.1 試験材料

本試験で使用した試料は、直径 2[inch]の単結晶シリコン ウエハで、試験前にアセトン、エタノール、イオン交換水 (純水)の順に各5分間の超音波洗浄を行い、硬さ試験を 実施した.なお、本試験で用いたシリコンウエハのミラー 指数は(100)、(110)、(111)、(331)の4種類である.

3.2 試験装置

本試験では,超微小押込み硬さ試験機(株式会社エリオ ニクス製 ENT-1100a)を用いた. Fig.3 に装置の概略図を示 す.

この試験機で設定可能な押込み荷重の範囲は, 10[mgf] (9.8[µN]) ~100[gf] (980[mN]) までであり,押込み深さは測 定分解能が 0.3[nm]の高分解能静電容量変位計によって直 接測定する.本試験機は,圧子を事前に設定した微小な押 込み荷重で試料表面に押込み,その押込み荷重と圧子の押 込み深さとを連続的に測定することにより,試料表面の硬 さ特性を評価する.

試験機本体は高性能防振台に載せてあるために,通常の 試験環境における振動の影響は無いものと考えてデータ の処理を行った.また,試験機本体を樹脂製のカバーで覆 うことで防塵,防風対策を行っている.試験時におけるカ バー内の雰囲気温度は恒温装置により28±1[℃]に設定され ている.

本試験機で使用した圧子は、稜間角度が 115[deg]の三角 すい圧子で、押込み荷重を 98[µN]から 980[mN]の範囲で設 定可能である.また、押込み深さは、測定分解能が 0.3[nm] の高分解能静電容量センサによって測定した.



Fig.3 Schematic drawing of Equipment

3.3 試験方法

まず圧子を超音波洗浄し, 圧子先端部に不純物が付着し ていないことを確認する. 微小押込み硬さ試験機にシリコ ンウエハを設置し, 設定した押込み荷重によって圧子を試 験面に押込む. そして, その時の押込み荷重 Pと圧子の押 込み深さhとの関係から設定押込み荷重 Pにおける押込み 深さhを (2.3) 式に代入することによってマルテンス硬さ HMを求めた. なお, 硬さ試験は同条件で5回実施した.

3.4 試験条件

本試験では、マルテンス硬さに及ぼす結晶面や結晶方位 の影響を明らかにするために、Fig.4 に示すように圧子の回 転角度を設定し、押込み時の圧子を 0[deg]から 360[deg]ま で 15[deg]毎に回転させて硬さ試験を行った.また、本試験 では負荷時間 10[sec]-保持時間 1[sec]-除荷時間 10[sec]とし、 雰囲気温度は 28±1[℃]に設定した.



Fig.4 Indetation angle

4. 試験結果及び考察

Fig.5~Fig.8 に, 圧子の回転角度をそれぞれ 0[deg], 30[deg], 60[deg], 90[deg]とした場合の, ミラー指数が(100) における押込み荷重 P と押込み深さ h との関係を示す. こ のときの最大押込み荷重(設定押込み荷重)Pは, 0.1[mN], 0.5[mN], 1.0[mN], 5.0[mN], 10[mN], 20[mN], 30[mN], 40[mN], 50[mN], 100[mN], 150[mN], 200[mN]の 12 段階 として, 各荷重で5回測定した.



Fig.5 Relationship between Normal load and Indentation depth: Miller index(100), Indentation angle 0[deg]











S Fig.8 Relationship between Normal load and Indentation depth: Miller index(100), Indentation angle 90[deg]

これらの結果から、いずれの圧子の回転角度においても 押込み荷重の増加に伴って最大押込み深さも増加するこ とや、押込み荷重を変化させた場合でも、類似した特性線 を示すことが確認できる.

Fig.9 に, マルテンス硬さ HM と押込み荷重 P との関係 を回転角度をパラメータとして示す.単結晶シリコンウエ ハのミラー指数は(100)である.



Fig.9 Relationship between Martens Hardness and Normal load: Miller index (100)

これより、マルテンス硬さは押込み荷重が小さい時には 大きな値を示すが、押込み荷重の増加に伴って急激に減少 し、100[mN]以上ではほぼ一定の値を示すことが確認でき る.これは、押込み荷重の違いによってくぼみ周辺に発生 するクラックの大きさが異なるためであり、一定荷重以上 になるとくぼみ周辺にへき開が生じ、マルテンス硬さ値に 影響を及ぼすためと考える.また、圧子の回転角度によっ てマルテンス硬さが多少異なるものの、顕著な差異は認め られない.

Fig.10 に、ミラー指数が(100)におけるマルテンス硬さ HM と圧子の回転角度 θ との関係を押し込み荷重をパラメ ータとして示す.



これより、いずれの押込み荷重においても、圧子の回転 角度によってマルテンス硬さの値が比較的周期的に変動 していることが分かる.通常,硬さ試験には三角すい圧子 を用いているために、120[deg]間隔で周期的に同じ硬さ値 を示すことが予測されるが、どの押込み荷重においても厳 密に 120[deg]間隔で硬さの値が変化していないことが確認 される.

Fig.11 に、くぼみの SEM(Scanning Electron Microscope)写 真の一例を示す.押込み荷重は写真左が 100[mN],写真右 が 200[mN]である.なお、倍率は 8000 倍である.これよ り、押込み荷重が 100[mN]の場合には、くぼみ先端からの クラックの発生はほとんど確認できないが、押込み荷重が 200[mN]の場合には、くぼみ先端から大きなクラックが発 生していることが確認できる.また、Fig.9 より、押込み荷 重が 50mNまではマルテンス硬さが急激に低下する荷重依 存性が認められる.このことから、シリコンウエハの硬さ を試料面を破壊することなく測定するためには、最大押込 み荷重が 100[mN]以下が妥当であると考える.



Fig.11 SEM Photograph of Indentaition after experiment (left:100[mN], right:200[mN])

そこで本研究では、最大押込み荷重 100[mN]で測定し、 ミラー指数(100)、(110)、(111)、(331)の単結晶シリコンウ エハのマルテンス硬さ値を比較検討した.

Fig.12 に、押込み荷重 100[mN]におけるマルテンス硬さ HMと圧子の回転角度 θ との関係をミラー指数毎に示す.

また, Fig.13 に, ダイヤモンド構造のモデル及び各原子 配列のモデルを示す.





Fig.13 Crystal orientation of Diamond structure

これより、(100):○と(110):●は比較的同程度のマルテ ンス硬さ値を示していることが分かる.これに対して、 (111):□はマルテンス硬さ値が平均的に高いことが分かる. これは、Fig.13の原子配列を比較すると、(111)には Si 原 子が密集している領域があり、これが圧子を押込む際の抵 抗となり、他の結晶面より高いマルテンス硬さ値を示した ものと考える.また、(331):■は他の結晶面と比較してマ ルテンス硬さ値が低いことが分かる.これは、他の原子配 列と比較すると、原子同士の結合が少なく、(111)のような 原子の密集もないため、圧子を押込む際の抵抗が他の結晶 面より低くなったことに起因すると考える.

5. まとめ

ナノインデンテーション法を用いた硬さ測定において, 圧子の回転角度を変化させることによって,単結晶シリコ ンのマルテンス硬さに及ぼす結晶面や結晶方位の影響に ついて次のことが明らかになった.

- (1) いずれの圧子の回転角度においても,押込み荷重の 増加に伴って最大押込み深さも増加し,押込み荷重 を変化させた場合でも類似した特性線を示す.
- (2) マルテンス硬さは最大押込み荷重が小さい時には大 きな値を示すが,最大押込み荷重の増加に伴って急 激に減少し,100[mN]以上ではほぼ一定の値を示す.
- (3) 押込み荷重の違いによってマルテンス硬さの値が変 化することにより、荷重依存性が確認できた.
- (4) 結晶面の違いによってマルテンス硬さが異なり、その原因は原子配列の影響が大きい.
- (5) 圧子の回転角度によってマルテンス硬さ値が比較的 周期的に変動する.

参考文献

- 福田勝己,小林光男,角田 陽,高畦干翔,本多千 絵:ナノインデンテーション法による単結晶シリコ ンのマルテンス硬さに及ぼす結晶面の影響,第55 回日本学術会議材料工学連合講演会 講演論文集,(2011.10), pp.27-28
- 福田勝己,佐藤茂夫,石橋達弥,小林光男:ナノインデンテーションとその応用 材料試験技術, Vol.51, No.3, (2006), pp.57-62
- 3) 福田勝己,本目精吾,伊藤拓嗣:ナノインデンテーション法によるコーティング薄膜のナノ硬さ特性評価,八王子産学工連携機構第8回研究成果発表 講演会要旨集,(2008), pp.16-17
- 4) ISO/TC 164/SC 3 N 771, 試験法, (2001)
- 5) 福田勝己:薄膜のトライボロジー特性評価-ナノイ ンデンテーション法による評価を中心に-,月刊ト ライボロジー(新樹社), (2012.2), pp.26-28

(平成24年1月6日 受理)

偏波保持光ファイバを用いた光マイクロホンの特性評価

新國広幸*

Characterization of a Optical Microphone with Polarization Maintaining Fiber Hiroyuki NIKKUNI

In this study, a optical microphone using polarization maintaining fiber was experimentally examined. The microphone consists of a square diaphragm and the fiber on the diaphragm. The dimensions of the fabricated microphone were $20 \text{mm} \times 20 \text{mm} \times 0.139 \text{mm}$. In order to measure the phase sensitivity, pressure was applied to the diaphragm by a syringe. The microphone was successfully tested using a semiconductor laser at 635nm. The sensitivity was evaluated to be 0.16mrad/Pa which was smaller than that of the theoretical estimate by a factor of 1/19.

Keywords : optical microphone, diaphragm, polarization maintaining fiber

1. はじめ

人体の断層像や機能を無侵襲で計測できる MRI 診断において、医者と患者がコミュニケーションを とる場合、マイクロホンが必要であるが、MRI 装置 は強磁界を発生するため、電磁作用を利用したマイ クロホンや金属部品を含んでいるマイクロホンは使 用できない.光を利用したマイクロホンは、電磁誘 導の影響を受けることがなく, 金属部品も使用して いないため, MRI のような強磁界環境下でも使用可 能であり、MRI における医師と患者のコミュニケー ションの改善や脳機能研究の進歩に貢献すると期待 できる. さらに、光マイクロホンは防爆性の特徴も 有するため,工業用プラントや原子力発電所など でも信頼性・安全性の高い計測が期待できる.本 マイクロホンを AE (Acoustic Emission) センサと して用いることで,工業用プラントや原子力発電 所の異常検知、大規模災害の予防に貢献できると 考える.

光マイクロホンには、光学部品を組み合わせたバルク 型、光導波型、光ファイバ型がある.^{(1), (2)}光導波型は、 光学部品やセンシング部をワンチップ上に集積化させた 構造をしており、センササイズの小型・軽量化を実現で きる.本研究の最終目標は光導波型マイクロホンを実現 することにあるが、本報告では、導波路を作製すること なく、光ファイバをダイヤフラム基板に接着させ た簡易光マイクロホンにより,光導波型マイクロホンの特性を簡易に評価することにした.

また、本研究では理論と実験の比較に重点を置いた基礎研究であるため、ダイヤフラム基板の材料としては、材料力学定数及び光学定数が良く知られている必要がある。光導波型センサの基板には微細加工に優れているシリコン基板は良く使われるが、可視光光源を使用する場合、光導波路を多層構造にする必要があり、シリコンは異方性を持つため、基礎研究の材料としては適当とは言えない。一方、ガラスは、等方性材料で、材料力学定数及び光学定数が良く知られているため、本研究では、基板としてガラスを選択した。

本研究では、偏波保持ファイバをガラスダイヤ フラムに接着させた簡易光導波型マイクロホンを 試作し、その感度を評価、理論値と比較・検討す る.

2. マイクロホンの構成および動作原理

光導波型マイクロホンは、図1に示すように音 圧感知部としてのダイヤフラムと、単一モード直 線光導波路で構成される.本研究で試作する簡易 光導波型マイクロホンでは、導波路の部分を偏波 保持光ファイバとして、ガラスダイヤフラム上に 光ファイバを接着させた.光ファイバには最低次
の TM-like, TE-like モード光のみを伝搬させる. また,音の回折の影響を減らすために,音圧がダ イヤフラムの片側にのみ当たるように,マイクロ ホンの下面は小孔付基板で覆われている.なお, 小孔は,ダイヤフラム下部の密閉空間と周囲雰囲 気をつなぐことによって大気圧の変動による影響 をなくす役割を果たしている.



図1 光導波型マイクロホンの概形

本研究で試作する光マイクロホンは, TM-like, TE-like モード光を同強度で励起させるために, 偏 光子の偏光方向をマイクロホン基板面に対して 45°に傾け、光ファイバ端面に光波を入射する.ダ イヤフラムに音圧が加わると、ダイヤフラム上の 光ファイバにたわみが起こり、 歪みが生じる. こ の歪みは光弾性効果により、光ファイバに屈折率 変化を引き起こす. 屈折率変化により, 光ファイ バを伝搬する光波の位相が変化する.このとき, TM-like, TE-like モード光は、それぞれ異なる位 相変化量を得るため、音圧印加時には両モード間 に位相差が生じる.出力端では、この位相差に応 じて, 直線, 楕円, 円偏光のいずれかの偏光状態 となる. 最後に、マイクロホンの出力側に置かれ た検光子により、印加音圧に対応した出力光強度 が得られる.

3. 実験

3. 1 ダイヤフラムサイズの設計

光導波型マイクロホンの仕様に,位相感度と周 波数帯域があり,共に音波感知部であるダイヤフ ラムのサイズに依存する.周波数帯域に関しては, その上限周波数が共振周波数によって制限される. 先行研究により,位相感度はダイヤフラム辺長の 3 乗に比例し,ダイヤフラム厚の2 乗に反比例す ることが分かっている.⁽³⁾また,共振周波数はダ イヤフラム厚に比例し、ダイヤフラム辺長の2乗 に反比例することも明らかになっている.⁽⁴⁾

これらの依存性を基に,光導波型マイクロホン を設計するための,位相感度と共振周波数に関す る設計線図を作成した。図2がその線図である。 本線図の作成では,導波路の位置を感度が最も高 いダイヤフラムの端とし,ダイヤフラム形状を正 方形とした。また,光波の波長は633 nm とした。 センサ構成材料の材料力学定数,光学定数として は,センサ基板として使用する Corning 0211 ガラ スの値を使用した。ただし,光弾性係数に関して は,Corning 0211 ガラスの値が分からないため, 溶融石英の値を代わりに用いた。



図2光導波型マイクロホンの設計線図

図において、実線は位相感度とダイヤフラムサ イズの関係を示す等感度直線である。感度はダイ ヤフラム辺長の3乗に比例し、ダイヤフラム厚の 2乗に反比例するため、実線の傾きは1.5となる。 また、点線は共振周波数とダイヤフラムサイズの 関係を表す等共振周波数直線である。共振周波数 は、ダイヤフラム辺長の2乗に反比例し、ダイヤ フラム厚に比例するので、点線の傾きは2となる。 所望の感度および共振周波数の値と一致する等感 度直線と等共振周波数直線を設計線図から見つけ、 その交点が示すダイヤフラム厚とダイヤフラム辺 長が、要求仕様を満たすダイヤフラムサイズとな る.

本研究では、人の音声を対象とした光導波型マ イクロホンの設計を行った.マイクロホンの動作 確認を行う目的で、周波数帯域を電話と同じ 300 Hz ~ 3000 Hz として, 共振周波数を 3200 Hz と した. また, 位相感度を 3.0 mrad/Pa と設定した. 図 2 のダイヤフラム設計線図を利用して, ダイヤ フラムサイズは, 20 mm × 20 mm × 0.139 mm と決 まった.

3.2 実験方法と結果

本研究で試作する光マイクロホンのダイヤフラ ムは、ダイヤフラム材料としての Corning 0211 ガ ラスと、ダイヤフラム支持基板としての穴あきソ ーダライムガラスを接着させることで作製した. 次に、被覆を除去した偏波保持光ファイバをダイ ヤフラムの縁に沿って貼り付け、マイクロホンを 作製した.最後に.音の回折からダイヤフラムの 片面をシールドするために、小孔付き基板を光マ イクロホンの底部に取り付けた.



図3 実験系概略図

試作マイクロホンの位相感度を明らかにするた めに図3のような実験系を構築し, 圧力-出力特性 を測定した.光マイクロホンに圧力を加えるため に、ダイヤフラム下部にシリコーンチューブを介 して注射器を接続した.光源には、波長 635 nm, 直線偏光の半導体レーザを利用した.波長板は TM-like, TE-like モード光間に位相差を生じさせ, 圧力-出力特性の初期位相を調整することが可能 となる.マイクロホン出力光をピンホールに通過 させることで、光ファイバコア以外の余分な光を 除去し、光検出器で光強度の測定を行った.

図4に測定結果を示す.図において,横軸は印 加圧力を,縦軸は光検出器の出力電圧を表してい る.図のプロットは測定値を,実線は最小2乗法 による近似曲線を示している.圧力に依存したマ イクロホン出力を得ることができた.半波長圧力 が19 kPaとなり,πを半波長圧力で割ることで位 相感度は 0.16 mrad/Pa と算出された.これは,理 論値の 3.0 mrad/Pa と比較すると,1/19 倍と非常に 小さな値となっている.本研究の理論解析はガラ スダイヤフラム内に導波路を作製したという仮定 で実施したが,実験では光ファイバをダイヤフラ ム表面に張り付けたため,実験値と理論値に相違 があったと考えられる.導波路位置の違いにより, 光ファイバコアに生じる応力が計算値と比較して 小さく,光弾性効果による屈折率変化が減少して しまい,位相感度が低下したと思われる.



図 4. 試作マイクロホンの圧力-出力特性

また,静圧特性の0Paでの傾きの大きさは,マ イクロホン感度となるため,初期位相は90°とな ることが望ましいが,今回の測定では0°程度で あった.その理由としては偏波保持光ファイバの 進相軸に対して45°の直線偏光で入射したこと によるファイバ内での偏光状態の変化がある.偏 波保持光ファイバの進相軸と入力の偏光軸がずれ ると"ビート長"と呼ばれる距離を1周期として偏 光状態に変化が生じる.しかし初期位相は,偏波 保持光ファイバの長さを,ビート長を考慮して変 更するだけで簡単に調整することができる.

図4より0 Pa付近の近似直線の傾きの大きさ, つまりマイクロホン感度は17.8 mV/kPaであるこ とが分かった.しかし,位相の調整を行い,光マ イクロホンの初期位相を90°とすることで,最大 で約 50.8 mV/Pa 程度のマイクロホン感度を得る ことが可能となる.

4. 結論

本研究では、偏波保持光ファイバを利用した簡

易光導波型マイクロホンを試作し、その感度を評価した.印可圧力に応じて光強度が変化することを確認できたが、感度が0.16 mrad/Paで、理論値の1/19 倍の値で理論値と測定値に大きな違いが見られた.実験と理論で、マイクロホン構造が異なっていたことが原因であるため、今後、理論解析においてガラスダイヤフラム上に光ファイバを接着した条件で再度計算する.

謝辞

本研究の一部は,東京工業高等専門学校の平成 22 年度重点配分経費により行われた.

参考文献

- (1) H. Nikkuni, Y. Mogi, M. Hayashi, M. Ohkawa, S. Sekine, and T. Sato, "Improvement of the signal-to-noise ratio in a glass-based guided-wave optical microphone," Proc. SPIE 6475, pp. 647519-1 \sim 647519-8 (2007).
- (2) N. Zeng, and C. Shi, "Diaphragm-type fiber-optic interferometric acoustic sensor," Opt. Eng. 42(9), pp. 2558 – 2562 (2003).
- (3) H. Nikkuni, Y. Watanabe, M. Ohkawa, and T. Sato, "Sensitivity dependences on side length and aspect ratio of a diaphragm in a glass-based guided-wave optical pressure sensor," Opt. Express 16, pp. 15024-15032 (2008).
- (4) 新國広幸, 大河正志, "光導波型マイクロホン における共振周波数のダイヤフラム厚依存 性,"東京高専研究報告書, 第42(2)号, pp. 105 -108 (2011).

(平成24年1月5日 受理)

フォトリソグラフィを用いたMOEMS技術の教材開発

伊藤 浩*, 新國広幸*

Development of teaching materials for MOEMS technology using photolithography Hiroshi ITO, Hiroyuki NIKKUNI

We experimentally examined photolithographic process in order to develop educational materials for MOEMS using photolithography. By the study, the processing accuracy was evaluated to be 3 μ m. Also, single mode optical waveguides on silicon were successfully fabricated by the photolithography. Moreover, the pectinate electrode for the evaluation of condensed matter was fabricated by the photolithographic process on the silicon and some film materials and then the electrical resistivities of the samples were easily measured by the electrical tester. It was noted that the photolithography would be the base system for teaching materials of the student's experiment in the MOEMS technologies.

Keywords : MOEMS, photolithography, condensed matter

1. はじめに

電子回路,光学部品,微細機械構造などの異な る要素を集積化させた微細システムのことを MOEMS (光・電気・機械マイクロシステム)とい う. MOEMS は,小型・軽量でありながら高度な 機能を実現し,様々な分野で応用されている.例 えば,MOEMS 技術を利用して,光導波路と機械 構造を一つのチップ上に一体形成させた光集積回 路圧力センサや加速度センサが開発されている. ^{(1),(2)}また,コンピュータ用プロジェクタや劇場映 写機に多く用いられている DMD (Digital Micromirror Device) も MOEMS 技術を核として作 製されている.

MOEMS の製作にはフォトリソグラフィ技術が 不可欠である.フォトリソグラフィとは,光を用 いて基板,薄膜に所望のパターンを転写する技術 のことであり,微細加工性,加工再現性,一括生 産性に優れる.近年のリソグラフィ技術の微細化 に伴って,ナノサイズの新しい機能性デバイスが 多く開発されている.

MOEMS デバイスは,光学,電気工学,機械工 学といった様々な技術を駆使して作製する必要が あり,既存のデバイス作製プロセスでは作製でき ない.そのため,学科間の横断的連携を伴った基 礎的研究が必要となる. さらに、フォトリソグラフィ技術、MOEMS 技術は、研究レベルのみならず、実用レベルで活発 に利用されており、地域企業との共同研究の実施、 MOEMS 作製技術者の育成需要も高まっている.

本取り組みでは、フォトリソグラフィを用いた MOEMS 技術を本校の教育・研究システムに導入 することで、MOEMS 技術者の育成ならびに新た な MOEMS デバイス創生を目的とする.その第1 段階として、本報告では、フォトリソグラフィに 関する基礎的データの収集を行い、応用として、 光導波路の作製及び物性評価デバイスの構築を実 施した.

2. フォトリソグラフィ技術

2.1 概要

MOEMS の微細構造を実現するには、まず基板 上に薄膜を成膜し、その上に感光材料であるフォ トレジストを塗布する.次に、フォトレジスト膜 を露光・現像することでレジストに2次元パター ンを形成する.最後に、リフトオフやエッチング により、深さ、厚さをもった立体構造を作製する.

2.2 薄膜作製

図1に示すスパッタリング装置 (アルバック製

SH-350-C10) を利用して基板上に薄膜を作製する. 本実験では, RF スパッタリング法で Si 基板上に SiO₂ 薄膜を成膜する. 基板-ターゲット間距離は 10 cm とし,成膜中,基板を 6 rpm で回転させた. Ar ガス圧を 0.6 Pa とし,スパッタ電力を 700 W, 500 W, 300 W,成膜時間を 5 分, 10 分, 20 分, 30 分と変化させた条件それぞれにおいて成膜を 行った. 試作した各々の薄膜の厚さを AFM (SII 製 Nanopics 1000) により測定した.

図 2 に測定した膜厚-時間特性を示す. スパッタ 電力 700 W, 500 W, 300 W の成膜レートは 各々 8.7 nm/min 6.4 nm/min, 2.8 nm/min となった.

2.3 レジスト塗布

基板上に薄膜を成膜後,フォトレジストを塗布 した.フォトレジストには,東京応化工業製のポ ジ型レジスト OFPR-800 (粘度:44cP)を用いた. レジストの塗布には,図3に示すスピンコータ(ミ カサ社製 MS-A100)を利用した.レジスト塗布の 手順を以下に述べる.はじめに,レジスト液をス



図1 スパッタリング装置



図2 SiO₂スパッタの膜厚-時間特性

ポイトで吸引し, 基板上に塗布する. スピンコー タによるレジスト塗布は, 2 段階の回転にて行う. まず, 1 段階目では, 低速回転でレジスト液を基 板面上に万遍なく塗布する. 2 段階目では, 高速 回転にてレジスト液を任意の厚さに調整する. 実 験では, 1 段階目は回転数を 800 rpm として 3 秒 間回転させた. 2 段階目は 1000~5000 rpm まで変 化させて 20 秒間回転させ, 試作後それぞれのレジ スト膜厚を AFM (SII 製 Nanopics 1000) により測 定した.

レジスト膜厚と2段階目スピン回転数の関係を 図4に示す。回転数の上昇に応じて、膜厚が薄く なっており、OFPR-800のカタログ値と同等の特 性であることを確認した.

ところで、レジスト塗布では、レジスト液と基 板材料との密着性が問題となる場合がある.例え ば、Si 基板の場合、レジスト液との密着性が低く、 現像時にレジストがマスクパターン通りに転写で きないことがある.そこで、Si 基板を用いる場合 は、表面活性剤(東京応化工業製 OAP)を用い る.実験では、レジスト塗布前に、スピンコータ にて表面活性剤を均一に塗布し、電気炉にて90℃ で5分間乾燥させた.

フォトレジスト塗布後、基板を電気炉にて乾燥



図3スピンコータ

4 6 7 1 1 0 0 0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 回転数 [rpm]

図4 レジスト膜厚とスピン回転数の関係

させプリベークを行う.こうすることで、レジス トの溶媒を蒸発させて、薄膜とレジストの密着性 向上と露光時の光反応安定化を図る.プリベーク 条件によってレジストの基板との密着性、転写特 性が異なるため、実験では乾燥温度、時間をパラ メータに特性を評価した.その結果、90℃、30分 が最も密着性、転写特性が良いことが分かった.

2. 4 露光·現像

露光とは、フォトレジストを塗布した基板に、 マスクを通して光を照射し、微細なパターンを転 写する工程である.露光装置として、図5に示す ミカサ社製 M-1S を用い、基板とマスクを密着さ せるコンタクト式露光でパターンを転写した.

露光工程では,露光時間に依存してパターンの 転写特性が変化する.露光時間が短い場合,十分 にフォトレジストが感光されず,現像後にポジ型 ではフォトレジストが残る.また,露光時間が長 い場合にはパターン寸法以上に感光する.本実験 では,現像した結果を確認し,露光時間は10秒と した.

現像工程では,露光後のサンプルを有機溶剤の 現像液にある一定時間浸すことで,ポジ型では感 光した部分が溶解し,パターンが形成される.現 像液には,東京応化工業製のNMD-Wを利用した. 本実験では転写パターンを確認しながら現像時間 を変化させた結果,60秒が最適であることを確認 した.

図 6 のようなマスクを使用し、最小微細加工寸 法を評価した.図 6 における線上部の数字は線の 幅を示している.数字 2,3 下部の線幅は各々2 μ m, 3 μ m である.線幅 1 ~ 5 μ m のマスクパターンを



図5 露光装置



図6マスクの写真



図7 現像後の3 µm パターン

利用して露光・現像を行った結果,最小微細加工 寸法は3 µm と評価された.(図7)1 µm,2 µmの 線幅パターンについてはそれぞれ2 µm,3 µm に なっていて,共に1 µm 程度太くなっていた.こ の要因は,基板とマスクが密着していないことで, 光がマスクの下部に回り込んだためだと考えられ る.

3. 光導波路の作製と評価

3.1 設計

設計した光導波路の概略図を図8に示す. 基板 にはSiを用い,Si基板上に装荷型光導波路を作製 する.なお,光導波路の形状は直線とした.Siは, 電子回路との集積化が可能,微細加工性に優れる などの特長を持つ.しかし,Siは屈折率が高いの で,Si上に直接薄膜を堆積させて導波路を作りつ けることはできない.そのため,Si基板上にバッ ファ層としてSiO₂を堆積させ、その上に導波層薄 膜を作製する.本実験では,導波層材料として, 光学ガラスによく利用されている光の透過率の高 いBK7ガラスを選択した.BK7ガラスの導波層 をバッファ層,装荷層のSiO₂膜で挟むことで,チ ャネル型の光導波路を構成できる.

本実験で作製する光導波路はシングルモード光 導波路とする。シングルモード導波路は光の位相



図8 設計した光導波路の断面図

情報を利用できる,広帯域の通信に利用できる等 の利点を持っている.シングルモード条件と Si 基板への放射損失等を考慮して,光導波路の導波 路幅,バッファ層厚(SiO₂),導波層厚(BK7),装 荷層厚(SiO₂)をそれぞれ,3 µm,1.5 µm,1.2 µm, 0.4 µm とした.これらの設計値を基に,電子線描 画装置(Advantest 社製 F5112)を利用してフォ トマスクを作製した.

3.2 作製と評価

Si 基板上に 1.5 µm 厚の SiO₂薄膜をスパッタ法 により成膜し, さらにその上に 1.2 µm 厚 BK7 ガ ラスを堆積させた. 最後に, リフトオフ法により SiO₂装荷層を作製した. リフトオフ法では, まず BK7 ガラス薄膜上にフォトリソグラフィにより 導波路パターンを露光・現像した. 次にその上に SiO₂ 膜を堆積させ, レジスト剥離液(東京応化工 業製 104) によりレジストを除去し, SiO₂ 装荷層 を作製した.

図9に作製した光導波路のSEMによる撮影結 果を示す.作製した導波路の装荷層幅は4 µm程 度になっており、マスクの3 µmより大きくなっ てしまった.これは、現像・露光の段階ですでに 4 µm程度になっており、マスクと基板の密着不十 分により光がマスクの下部に回り込んだためであ る.装荷層の側面は少し荒れているが、本導波路 は装荷層下部の屈折率を等価的に高くすることで 導波路を形成しているため、今回の荒れ程度であ れば、伝搬損失への影響は小さいと考えられる.

4.物性評価デバイスの作製と評価

4.1 物性評価デバイスの設計

物性評価として、導電率測定用のデバイスを設



unit 2 _______ Nut the void of the void o

BK7 導波層



計した.基本的な構造としては薄膜や基板上に二 つの電極を作製し、その電極間に電圧を加え、電 流を測定することで、薄膜や基板の抵抗を測定す ることができる.この抵抗値から、各種寸法を用 いて導電率又は,抵抗率を評価することができる. この測定は一般的に二端子法といい、抵抗値が大 きい場合(電極との接触抵抗が無視できる程度) に適している構造である.また、測定材料の抵抗 値が金属のように小さい場合、電極との接触抵抗 などの影響を受けるため、一般的に四端子法を用 いて評価する.

本実験では、測定対象として半導体薄膜などの 抵抗値が大きい材料を考えていることから、二端 子法を用いて評価することを考える.また、真性 半導体では抵抗率は $10^4 \sim 10^6 \Omega m$ 程度と高いこと から、電極構造において、電極間距離Lは小さく、 幅 W を大きくすることが必要になってくる.この 考えに基づき、図 10 に示す電極パターンを設計し



図 10 設計した電極パターンの概略図

た. 電極間距離 L を露光限界寸法の 3 μm から, 1mm までの 6 パターンとした.

表1に設計したLとWの長さ及び,膜厚300nm, 抵抗率が $10^5 \Omega m$ の場合の測定される抵抗値を示 す.この結果から,Lが $100 \mu m$ の場合,抵抗値が $M\Omega オーダとなり,精度良く測定可能であること$ が考えられる.

図 11 には実際に CAD 設計から作製したフォト マスクの写真を示す.フォトマスク作製には電子 線描画装置(Advantest 社製 F5112)を利用した.

4.2 作製方法

フォトリソグラフィの基本的な工程は2章と同 じである.しかし,評価材料としてシリコンウエ ハ,ITO 及び,TiO2を用いることから,フォトリ ソグラフィ工程の各条件は材料に応じて異なる. リフトオフによる電極パターン形成のリフトオフ 条件として,AI薄膜の膜厚,剥離剤に浸漬する剥 離時間,超音波の剥離条件を検討した.AIのスパ ッタ条件としてDCスパッタ300W一定で行った. 成膜時間を3分及び5分の2条件で行い,膜厚の 違いによる剥離の様子を観察した.

4.3 評価

図 12 に膜厚が 100nm の場合における Al 電極の リフトオフ結果を示す.この結果から電極幅は 100µm と大きい寸法にも関わらず,電極部の破損 が観測された.これは Al 膜の膜厚が厚く,剥離の 際に Al 膜の粒界の弱い部分でパターンに関係な く剥がれたものと考えられる.また,Al の膜厚を

表1 抵抗測定用電極パターンを用いた抵抗の予測値

電極間隔 L[μm]	電極幅 W[cm]	抵抗値[Ω]
3	3251	$3.08 imes 10^4$
6	1626	1.23×10^{5}
10	976	3.42×10^{5}
50	196	$8.50 imes10^6$
100	98.5	3.38×10^{7}
1000	10.7	3.12×10^{9}

※抵抗率 10⁵Ωm, 膜厚 300nm とした



図11 作製したフォトマスクの写真

50nm とした場合の観察結果を図 13 に示す.この 結果から,電極寸法が 3µm においても良好な結果 を得ることができた.図 14 に以上の条件により形 成した試料の写真を示す.この試料は,ITO 薄膜 上にアルミ電極を形成したもので,試料上部に電 極の破損部分が確認できる.これは元の試料の端 部であることから,試料固定のための汚れが付着 していたものと推察している.このことから,電 極形成には薄膜表面の洗浄がその後のパターン形 成に影響を与えることが分かる.中央の串刺し状 電極部は破損が見られず,パターン通りに形成で きていることが確認できた.

本電極パターンを用いて、シリコンウエハ、ITO 薄膜、TiO₂ 薄膜の抵抗値を測定した.その結果、 通常はテスタ等では測定できないシリコンウエハ の抵抗値を簡易的なテスタにて数百 k Ω と測定す ることができ、シリコンウエハの抵抗率を 10⁶ Ω cm と見積もることができた.しかし、シリコンウ エハの抵抗率は通常~100 Ω cm 程度であるのに対 し、非常に大きな値を示した.これは、アルミと シリコンとの界面がうまく接合されておらず、パ ターン通りに抵抗を測定できていないことが考え られる.そこで今後は、500°C程度の熱処理により、



図 12 膜厚 100nm の Al 電極のリフトオフ結果



図 13 膜厚 50nm の Al 電極のリフトオフ結果



図 14 Al 電極を形成した試料の写真

電極接合部の改善が必要であると考えている.

以上の結果より,物性評価用パターン形成にお けるフォトリングラフィの条件が整い,パターン 寸法が 3µm においても作製可能であることが確 かめられた.また,本実験で設計したマスクは物 性評価用として有用であり,容易に学生実験へ展 開できるものと思われる.

5. まとめ

本研究ではフォトリソグラフィを用いた MOEMS 技術の教材開発を目指して、フォトリソ グラフィに関する基礎的データの収集ならびに、 その応用として、光導波路の作製及び物性評価デ バイスシステムの構築を行った.基礎データ収集 では、スパッタリング法による成膜条件、フォト リソグラフィ条件の決定を実施した.最小微細加 工寸法は3μmと評価できた.

SiO₂/Si 基板上に装荷型光導波路を試作し,その SEM による形状評価を行い,光導波路として利用 できることを確認した.今後は,光導波路に実際 にレーザ光を入射して,伝搬損失,モード特性の 評価を実施していく.

物性評価用のパターンとして、櫛形電極のマス クを設計し、シリコンウエハ、ITO、TiO₂薄膜上 に電極パターンを形成した.その結果、抵抗値と して数 MΩ以下となり、精度良く測定が可能であ ることが確認できた.しかし、電極との接合部に おいては熱処理などの改善すべき課題はあるが、 将来的には学生実験等へ展開が容易であることが 確かめられた.

以上の成果より,導入したフォトリソグラフィ 装置の基礎的データが整い,学生実験,卒業研究 や共同研究などへ展開できる基盤は整った.今後 は各種マスクパターンを設計し,本システムが 様々な分野に応用され,さらに高専の教育研究が 推進していくものと思われる.

謝辞

本研究の一部は,東京工業高等専門学校の平成 22 年度重点配分経費により行われた.

東京大学大規模集積設計教育研究センター (VDEC) 所有の F5112+VD01 EB 描画装置 (株式 会社アドバンテスト寄付)を使用してマスクの作 製を行った. 文部科学省ナノテクネットワークの 支援を受けた.

参考文献

- M. Ohkawa, K. Hasebe, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on the diaphragm in integrated optic pressure sensors based on the elasto-optic effect," Appl. Opt. 41, pp. 5016-5021 (2002).
- (2) M. Ohkawa, M. Izutsu, and T. Sueta, "Integrated optic accelerometer employing a cantilever on a silicon substrate," Jpn. J. Appl. Phys. 28, pp. 287-288 (1989).

(平成24年1月5日 受理)

化合物半導体GaSのガラス基板上結晶成長

伊藤 浩*

Crystal Growth of Compound Semiconductor GaS on a Glass Substrate

Hiroshi ITO

Crystal growth of gallium sulfide (GaS) was carried out using the electron beam vapor deposition on an amorphous glass substrate. The polycrystalline GaS thin films were deposited at the low substrate temperature of 100°C using the hot metal cover on the substrate. It was found that the crystal grains were growing at the deposited film thickness of more than 300nm from analysis of the measurement results of the X-ray diffraction patterns. The hexagonal surface structures were also observed by SEM related with the crystal structure of GaS. These hexagonal structures were growing beside the gallium rich grain.

Keywords : layered semiconductor, thin film, crystal growth

1. はじめに

Ⅲ-VI族化合物半導体である GaS(硫化ガリウム) は, 層内は共有結合で強く結合し, 層間はファン デルワールス力で結合した層状結晶構造である. また, GaS のバンドギャップは直接遷移 3.05[eV], 間接遷移 2.59[eV]であり、これは青色の可視光領 域に対応する. そのため, GaS は層状半導体と呼 ばれ,層状構造特有の電気的・光学的な異方性を 示す.これらの特徴から、角度を認識することが できる光センサー、可視光領域で発光する光デバ イスや太陽光発電セルなどへの応用が期待できる. また、層状結晶における層間結合は弱いファン・ デル・ワールス力により結合しているため、結晶 成長において基板の影響を受けにくく、また構造 自体が2次元結晶構造であることから,結晶化が 容易であることが言われている.また,層状結晶 表面には結合手が存在せず,表面不活性な表面状 態としてトライポロジーの分野でも注目されてい る. 通常,結晶化には基板加熱により結晶核を生 成させる必要があるため, 基板には高融点材料で 清浄な基板表面が求められる. この基板加熱のプ ロセス温度が低温化(100℃程度)できれば、フレ キシブルで安価な有機材基板上に半導体デバイス を創製でき、電気電子分野以外の幅広い分野で応 用が期待できる.

本研究では,層状半導体 GaS 結晶成長の低温化 について,電子照射の影響,結晶成長メカニズム ついて検討してきている.今回の報告ではさらに 低温時の詳細な実験を行い,電子照射が与える影響を検討した.その結果,電子照射によって GaS の結晶化に強く影響し,低温化へ寄与することが確認できた.また,GaSの薄膜結晶において,Ga 及びSの原子が持つ特性から,特有の成長機構を示すことがわかった.

2. 実験方法

2.1 電子照射法による低温結晶化

一般的に薄膜の結晶成長には,基板上に飛来した粒子の表面拡散,入射頻度,脱離など関係することが知られている.これらの要因をまとめて,結晶化への活性化エネルギーΔEaと表し,低温結晶化にはこのΔEaを下げる工夫が必要となる(図



 通常、ΔEaを越えるためには基板を加熱し、 熱力学的エネルギーにより結晶成長を促進させる ため、高い基板温度の状態で成膜が行われる.そこで、本実験で提案する電子照射法とは、基板加 熱に代わり基板表面に電子を加速し照射させた作 用(ΔEa')により、ΔEaを低下させ、結晶化を促進さ せる考えである.このような照射電子の与えるも のとして、電子の運動エネルギー又は、静電エネ ルギーなどと関係することが考えられる.そこで、 本実験では照射量をフィラメント電流、照射エネ ルギーを基板電圧によりパラメータを可変させ、 低温時における結晶成長への影響を検討する.

2. 2 GaS 薄膜の作製方法と評価

本実験には、基板バイアス、電子照射機能を搭 載した電子ビーム蒸着装置(図 2)を用い、無ア ルカリガラス基板(コーニング 7059)上に GaS 薄膜を作製した. 母材には純度 99.99[%]の塊状結 晶 GaS を使用した. 成膜時圧力 P は 2.7×10⁻³ [Pa] 以下、成膜速度 D_s は約 7 [Å/s]、水晶振動子膜厚 計の発振周波数変化量 ΔF は 15 [kHz]とし、膜厚 は約 0.7[μ m]とした. 基板表面温度 T_s は 100, 125, 150[\mathbb{C}]とし、基板バイアス V_b を 100[V]、電子照 射のフィラメント電流 I_f を 0, 5, 6 [A]とした. 基 板温度の均一化のため、基板上部に金属カバーを 設置した(図 3).

作製した GaS 薄膜の評価には X 線回折装置 (XRD)を用いて回折強度及び半値幅(FWHM)から 結晶性の評価を行った.また,原子間力顕微鏡 (AFM),走査型電子顕微鏡(SEM)を用い,低温時 における電子照射効果と膜成長(結晶化)の関係 について検討した.

3. 実験結果

3. 1 GaS 薄膜の結晶性

図4に蒸発速度を一定で膜厚を変化させたとき のGaS薄膜のXRDパターンを示す.この結果か ら膜厚に依存して結晶性が変化していることが確 認できる. 膜厚が薄い膜成長初期の段階では非晶 質性を示すが、膜厚が 300nm と増加すると結晶化 し、さらに 700nm ではピーク強度が増加し、結晶 性も向上している. さらに基板温度が 150℃の実



図2 電子ビーム蒸着装置図



図3 基板上部に設置した金属カバー



験においても同様な結果を得ている。このことより, GaS の結晶成長には 300nm 以上の膜厚が必要



図 5 Intensity and FWHM of GaS films.



であり、基板との界面では非晶質な構造の GaS 薄膜となっていることが推察される.その後成長 と伴に、ファン・デル・ワールス面が成長すると、 GaSの2次元結晶成長へと相変化するものと考え られる.図5にGaS薄膜の回折ピークの強度、半 値幅を示す.横軸は厳密に電子照射量を測定して いない為、熱電子の理論からフィラメント電流の 4乗として見積もり、間接的に電子照射量として プロットした.この結果から、基板温度 150[℃] 時、フィラメント電流 *I*=5~6[A]では急激に回折 強度が増加していることが分かる.また半値幅に おいては全ての基板温度に対して同様の減少傾向 が確認でき、電子照射量の増加によって結晶化が 促進されることが推察される.このことから 150[℃], *I_f*=6[A]時で特に電子照射法の効果を得られた.また,図6に(002),(004)面の回折ピーク強度比を示す.150[℃]において電子照射量の増加に伴い(004)面の比率が増加していること分かる.この結果より(004)面はGaS結晶構造のGa原子の結晶面に対応していることから電子照射エネルギーはGa原子に作用し,結晶化が促進されると推察される.

3.2 表面モルフォロジー

図 7 に電子照射電流に依存した基板温度 150[℃]の GaS 薄膜の表面 SEM 像を示す. この結 果から、全照射電流において、層が縦方向に成長 した a 軸配列の領域と, 層が横方向に成長した c 軸配列の領域が確認できる.このa軸配列はSEM 像において白い領域, c 軸配列は灰色の粒状の領 域になる.このa軸配列の白い粒は過去の考察に より蒸着速度が速い時,原子が基板表面上で表面 拡散をせず,層が a 軸配列に成長すると考えられ, すなわち蒸発原子の入射頻度が高い場合, 過飽和 な状態となり,核成長が促進されるために生ずる ものと考えらえる. GaS の場合, 2 次元結晶構造 のため、結晶成長はファンデルワースル面では弱 く, 層状方向(a 軸)方向が強く成長する. 照射 電流 I_f=0, 5[A]では, c軸配列の粒が細かく表面 上に成長しているが、 If =6[A]では相対的に大き な粒成長が確認できる.これは大きな照射電流(If =6[A]) では, 表面ポテンシャルエネルギーの低下 により、入射原子の表面拡散が促進され、その結 果c軸方向の結晶化が促進されたものと考えられ る. その粒の形状を確認すると、六方晶系の構造 をしており、これは GaS 結晶構造を反映した構造 であることが分かった.このことから電子照射に よって, 表面活性化エネルギーに影響を与えるこ とが確認でき, また, 結晶成長に作用することが 明らかとなった.また,図8にAFM 及びSEMか ら測定した粒径の電子照射電流依存性を示す.電 子照射量が増加するに伴い, a 軸配列の粒に対し て作用を及ぼしていないが, c 軸配列の粒におい ては粒径が増加していることが確認できる.この ことから電子照射法は c 軸方向の成長に寄与し, a 軸方向にはあまり影響を与えないものと考えるこ とができ、GaS 層状結晶化を促進する作用がある



(c) $I_f = 6[A]$

図7 基板温度 150 ℃の GaS 薄膜の SEM 像



🗵 8 Grain diameter of GaS films.

ことが確かめられた.また, a 軸方向の成長に関 しては VLS 成長機構によるものと考えている.

3. 3 GaS 結晶成長モデル

図 9 にガラス基板上で結晶化した GaS 薄膜の SEM 像を示す. この GaS 結晶に起因した六方晶 系構造は周りに白い領域が存在している. この領 域は EDX 分析により Ga リッチな領域であった. このことから低融点金属である Ga (融点 30°C) が低い基板温度(100°C)でも液状になり,気相

(Vapor) →液相(Liquid) →固相(Soild)のVLS 成長機構に依存した成長であることが推察される. このため,液状 Ga 領域内部では,層状 GaS 結晶 が成長し,一方ではホイスカー成長に見られる基



図9 結晶性 GaS 薄膜の SEM 像

板に対し垂直方向への成長が生じていると考えら れる.

4. まとめ

本研究では,層状半導体 GaS の低温結晶成長に おいて,電子照射による成膜手法を提案し,その 手法の有効性を示すことができた.この結果から, 照射電子が表面ポテンシャルエネルギーに作用し, 入射 Ga 原子及び,S 原子の表面拡散が促進するこ と,その促進作用によって層状方向に膜成長が促 進することが明らかとなった.また,層状方向と 垂直な方向にも成長することが観測され,この原 因として低融点金属の Ga 原子が作用し,成長過 程において,VLS 成長機構が関係することが推察 される.また,この VLS 成長機構によって層状結 晶も促進されているものと考えている.

以上の結果から今後は、より電子照射の物理的 作用を解明するために、電子照射量とエネルギー、 蒸着速度などのパラメータを変えた詳細な実験と 薄膜物性の評価を行い、GaS 薄膜の低温結晶成長 プロセスへの応用を検討していく.

謝辞

本研究の一部は,東京工業高等専門学校の平成 22 年度重点配分経費により行われた.

参考文献

- M. Ohkawa, K. Hasebe, S. Sekine, and T. Sato, "Relationship between sensitivity and waveguide position on the diaphragm in integrated optic pressure sensors based on the elasto-optic effect," Appl. Opt. 41, pp. 5016-5021 (2002).
- (2) M. Ohkawa, M. Izutsu, and T. Sueta, "Integrated optic accelerometer employing a cantilever on a silicon substrate," Jpn. J. Appl. Phys. 28, pp. 287-288 (1989).

アモルファスシリコンを用いて試作した MOSFETの電流-電圧特性

柚賀正光*

Current-Voltage characteristics of MOSFET with the amorphous Si built as trial

Masamitsu YUGA

The MOS (metal oxide semiconductor) FET (field effect transistor) was produced using an amorphous Si (a-Si). Usually, after producing silicon dioxide films (SiO_2) , the structure of MOSFET is made from single crystalline silicon (c-Si) by the method of impurity diffusing.

However, as the SiO_2 films does not grow on a-Si, the impurity diffusing cannot be used. Then, the a-Si was made to deposit on c-Si which was grown up beforehand SiO_2 . Deposition was performed using the equipment plasma CVD. In this case, the c-Si is n type and the a-Si becomes p type produced by high frequency electric discharge using SiH_4 and B_2H_6 .

Finally, source and drain are formed in the a-Si side and gate is made at the c-Si side. The source, drain and gate electrode was formed with vapor-deposited aluminum. Although the current between source and drain was quite small compared with c-Si MOSFET, if voltage was applied to gate electrode, the drain current I_D will begin to flow slightly by a formed channel. By measuring I_D influenced by V_G , an electron mobility μ inside a-Si and the threshold voltage V_T required for a channel to be formed were calculable.

As a result, the simulation of the μ obtained from measured value was able to be carried out using the assumed formula $\mu = \mu_0$ (exp (aV_G) -1) similar to current the diode. Here, the coefficient a became the range of 0.2 to 0.3, and the value of μ_0 was 0.02[cm²/Vs].

Keywords : amorphous Si, plasma CVD apparatus, MOSFET

1. はじめに

プラズマ CVD 法により作製できるアモル ファスシリコン(以下 a-Si と表記)は、単結 晶シリコン(以下 c-Si と表記)に比較して、 製法が簡単で、しかも、非常に安価である。 しかし、a-Si を素子化するには、表面に酸化 膜を成長させる必要がある。酸化膜は、IC 作 製においては不可欠であり、リソグラフィ法 や電子ビームなどにより、酸化膜の必要部分 に微細な穴を作り、ここから選択的に不純物 を拡散して、p型やn型を層状に微細加工で きる⁽¹⁾。シリコンの酸化膜 SiO₂は非常に高い 絶縁性があるので、こうした製法により IC 化 が可能になる。

a-Siの場合、非結晶であるので、そのままでは電子がトラップされ、良い特性は得られない。そこで、水素を導入して不活性にする

*電子工学科

が⁽²⁾、この水素が、400℃以上の高温で遊離してし まう⁽³⁾。c-Siでは、1200℃程度の温度で、表面に 酸化膜が成長するので、素子化は簡単であるが、 a-Siでは、当然そのような高温にさらすことはで きず、酸化膜を作ることができない。

高専の本研究室では、低温でも酸化膜が成長で きる陽極酸化法を研究しているが⁽⁴⁾、本報告では、 a-Siの素子化において、直接 a-Si 上に酸化膜を形 成せずに、電界効果トランジスタ FET(field effect transistor)を作製する方法を検討した。

実際に a-Si を用いて MOSFET 作製し、電流-電圧特性を測定したところ、得られた電流は c-Si に比較してかなり小さかったものの、理論的に導 かれる FET 構造の電流の式に一致した結果が得 られたので報告する。

2. a-Si: MOSFET の構造

通常の c-Si による MOSFET では、n チャンネル の場合、基板となる c-Si には p 型を選び、酸化膜 を成長させてから、近接した二か所を微細加工し て穴あけし、ここにリンなどの不純物をドープし て拡散させ n 型部分を作る。この二か所に、金属 (アルミ Al など)を真空蒸着して電極を形成し、

これがソースSおよびドレインDになる。また、 酸化膜の上に同様に電極を形成して、それをゲー トGとする。Gにかかる電圧により、S-D間の電 流を制御するのが MOSFET であり、金属 metal, 酸化物 oxide,半導体 semiconductor からなるので、 頭文字から MOS と呼ばれる⁽⁶⁾。

a-Siでは、安定した酸化膜が形成出来ないので、 本報告では、c-Siの酸化膜を用いることにした。

Fig.1 は、今回試作した a-Si: MOSFET の構造である。



Fig.1 The structure of a-Si; MOSFET built as a trial

作製方法は、初めに基板となる c-Si を用意する。 c-Si は n 型であり、比抵抗は 10[Ω -cm](リン濃度 10¹⁵[m⁻³])である。この基板上に、熱酸化法によ り酸化膜を成長させる。酸化膜容量は成長時間と 温度により変化する。本実験での酸化膜容量 Cox は、測定の結果 25[nF/cm²]であった。

つぎに、酸化膜の上に、プラズマ CVD 法によ り p 型の a-Si 薄膜を形成する。作製条件は、SiH₄ ガス(90%H₂)を 80[cc/min.], B₂H₆ ガス(497ppm)を 30[cc/min.]とし、基板温度は 250℃である。

最後に、S, D 電極作製のため、Al を真空蒸着 した。なお、G 電極は、この構造上 c-Si 基板の下 側に作製した。なお、電極幅 W とチャンネル長 L⁽⁶⁾の比は W/L=2 となっている。

3. 電流 I_D-電圧 V_D特性

S-G 間の電圧 $V_G を一定にして、S-D 間の電圧 V_D を増加しながら S-D 間の電流 I_D を測定すると、 I_D は、<math>V_D$ が小さい範囲で増加し、やがて飽和して 一定値になる。その様子を近似する c-Si; MOSFET のもっとも簡単な式は、つぎのようになる⁽⁷⁾。

(電流が飽和していない場合)

$$I_{D} = \frac{C_{ox}W\mu}{L} \{ (V_{G} - V_{T})V_{D} - \frac{V_{D}^{2}}{2} \}$$
(1)

(電流が飽和している場合)

$$I_{D} = \frac{C_{ox}W\mu}{2L} (V_{G} - V_{T})^{2}$$
(2)

ここで、 V_T は threshold 電圧と呼ばれ、チャン ネルが形成される直前の電圧になる。この値は、 V_G の値に影響され、 V_G が増加すると V_T も次第に 増加する傾向にある。また、 μ は電子の移動度 mobility[cm²/Vs]である。 実際にシミュレーショ ンする場合、飽和電流の値から μ の値を決定する 必要がある。

Fig.2 は、 V_G が 4~6[V]の場合の I_D - V_D 特性である。黒丸が測定値であり、点線は式(1)と式(2)によるシミュレーションした結果である。全般的に実際の電流は c-Si の場合と比較するとかなり小さい。

これは、非結晶であるので、後で示す μ の値がか なり小さいことを意味する。また、 V_G が小さいの で、電流が飽和したのち、 V_D の大きいところで若 干上昇しているのも見てとれる。また、電流が飽 和する前では、あまり良く一致していない。



Fig.2 Current-voltage characteristics of an a-Si n-channel MOS field effect transistor for various choices of gate voltage $V_G = 4 \sim 6[V]$

Fig.3 は、さらに V_G の値を増加させ V_G が 7~10[V]の場合の I_D -VD特性である。



Fig.3 Current-voltage characteristics of an a-Si n-channel MOS field effect transistor for various choices of gate voltage $V_G = 7 \sim 10[V]$

この場合、電流値は増加するが、やはり c-Si の場

合と比較するとかなり小さい。

Fig.4 は、さらに V_G の値を増加させ V_G が 15~ 25[V]の場合の I_D - V_D 特性である。 V_G が大きいの で、電流の飽和は安定している。また、電流の飽 和前でも、シミュレーションはよく一致している。



Fig.4 Current-voltage characteristics of an a-Si n-channel MOS field effect transistor for various choices of gate voltage $V_G = 15 \sim 25[V]$

4. 移動度 μ についての検討

移動度 μ の値は、 V_T のおおよその見積もりと 電流の飽和値から計算される。 V_T は、 V_G の増加 により大きくなるが、飽和の状態から見積もるこ とができる。後の図で示すように、 V_T は V_G によ りチャンネルが形成して、電流が流れ始める電圧 になるので、 V_G が小さい場合は 3[V]程度と小さ いが、 V_G の増加に従い増加し、およそ V_G の半分 程度の値になる。また、 μ の値も V_G の増加に伴 い増大する。 μ の値は、式(2)の飽和電流の値から 実験的に求めることができる。

測定結果の Fig.2, Fig.3, Fig.4 を用いて、 μ の 値を計算すると、今回の a-Si の場合、最大でも $2[cm^2/Vs]$ であり、c-Si 中の電子の移動度 100~ $1000[cm^2/Vs]$ に比較して極端に小さいことがわか った⁽⁸⁾。

Fig.5 は、 μ と V_G の関係を示したものであり、 図中黒丸で示したのが、測定値から得た結果である。



Fig.5 The simulation of electron mobility μ in consideration of the theoretical formula for MOSFET measurement data

Fig.5 における白い四角印は、本報告で、実験式 を想定してシミュレーションしたものである。結 果は非常によく一致したが、現時点では経験式に すぎない。

 μ の値は電流の値に直接関係する。ダイオードの電流 I の式は、一般に、つぎのように書ける⁽⁹⁾。

$$I = I_R \{ \exp(\frac{eV}{kT}) - 1 \}$$
(3)

ここに、 I_R は逆方向電流で、温度 T が一定であ れば、ほぼ一定で、小さい値になる。また V は順 方向電圧で、e は電子の電荷を示し、k はボルツ マン定数である。

そこで、μがこの式に経験的に一致するように、 V_Gに関する、つぎのような式を考えてみた。

$$\mu = \mu_0 \{ \exp(aV_G) - 1 \}$$
 (4)

 μ_0 は、基準となる移動度で、今回測定した最 も小さい V_G=4 の場合の測定値 0.02[cm²/Vs]を用 いた。また、係数 a の値は、およそ a = 0.2~0.3 としてシミュレーションした。

その結果、Fig.5 で示すように、かなり一致する

状態が得られた。

式(4)を精密に誘導することはできないが、電流 の式と同じ考えで計算すると、µの値が測定値と よく一致するので、式(4)は、内部の機構を示す経 験式であることが示唆された。

Fig.6 は、 V_G に依存する V_T と μ の値をプロットしたものである。



Fig.6 Comparison of coefficient a and threshold voltage V_T for the theoretical formula of mobility μ

 V_T の値は、 V_G =4~6[V]では 3「V」と小さいが、 V_Gが増加すると次第に増加し、 V_G =7~10[V]で V_T =4~7[V], V_G =15~25[V]で V_T =10~14[V]と なっている。

しかし、係数 a の値は、 $V_G=10[V]$ で、およそ 0.3 程度の最大値をとり、必ずしも V_G の増加によ り増加するわけではないのがわかる。係数 a は、 ダイオード電流の場合では、e/kT に対応するも のなので、本来温度が一定なら一定値になるはず であるが、 $0.2\sim0.3$ の幅が観測された。一応、数 値としては、狭い範囲であり一定値ともみなせる が、電流値がかなり小さいので、今後、検討の余 地はあると考えられる。

5. まとめ

アモルファスシリコン a-Si を用いて、MOSFET を作製し、その電流-電圧特製を測定した。単結晶 シリコン c-Si では、1200℃の高温で表面に酸化膜 を成長させられるので、簡単に MOSFET が作製 できるが、a-Si は、そのような高温に置くことが できないため、酸化膜を表面に成長させることが できない。そのため、MOSFET 構造を形成するこ と、すなわち素子化が困難である。

本報告では、c-Siを基板として用い a-Si の素子 化を検討した。MOS 構造の oxide の部分に c-Si の熱酸化膜を使用して、裏側にゲート電極を作製 するなどの工夫により、c-Si の MOSFET 特性と類 似の電流-電圧特性を得ることができた。ただし、 a-Si 内部の電子の移動度が、c-Si 内部の移動度に 比較して極端に小さく、その結果、測定した電流 も、大幅に少ない値になった。

しかし、ゲート電圧により、ソースードレイン 間の電流は制御できることが確認された。また、 電流のドレイン電圧による値も、c-Si: MOSFET の電流の理論式に、測定した小さな値の移動度を 用いることによりシミュレーションできること も判明した。

本報告において、移動度がゲート電圧に依存す る関係式を、ダイオードの電流の式に類似させて、 実験式を作り、その式を用いて移動度をシミュレ ーションした。その結果、測定値によく一致した 結果を得た。設定した式は、経験的なものであり、 それで完成ではないが、もともと移動度と電流に は比例関係があり、実験と理論の一致の仕方を見 ると、無関係ではないことが理解された。

本報告で作製した a-Si:MOSFET は、完全に a-Si のみで組み立てられたものではないが、本研究室 では、室温で酸化膜が成長できる陽極酸化法を研 究しており、将来において a-Si 表面に低温で直接 に酸化膜が成長出来れば、a-Si だけで組み立てら れる MOSFET が作製でき、従って、a-Si の素子化 の可能性についても考察の余地があることが示 唆された。

参考文献

- 前田和夫:最新LSIプロセス技術, 工業調査会 p307 (1984)
- (2) 超 LSI 時代のプラズマ化学, 工業調査会 p137 (1983)

- (3) アモルファス電子材料利用技術集成, サイエンスフォーラム p365 (1981)
- (4) 柚賀,大山,竹内:電気化学, Vol.68 pp575-581 (2000)
- (5) 武石,原,名取,堀内: MOS トランジスタの 動作理論 p21 (1980)
- (6) 菅野,榊:超LSIシステム入門, 培風館 p3 (1981)
- (7) J.Mavor,M.A.Jack,P.B.Denyer: Introduction to MOS LSI Design 産業図書 pp34-42 (1984)
- (8) A.S.Grove : Physics and Technology of Semiconductor Devices, A Wiley International Edition p110 (1967)
- (9) 高橋清:半導体工学, 森北出版 p124 (1978)

(平成23年10月21日 受理)

マイクロコンピュータ学習チュートリアルWebサイト

小坂敏文*, 松林勝志*, 吉本定伸*

The Tutorial Web Site for the Students Studying Microcomputers Toshifumi KOSAKA, Katsushi MATSUBAYASHI, Sadanobu YOSHIMOTO

The students that are Robocon Seminar members or Embedded System Project members study microcomputer to use it just as tool, while the students that study in Computer Science Course study microcomputer to study the principle of computers. For such students, the microcomputer tutorial Web site has been developed for ten years. This report shows the concept and abstracts of the Web site.

Keywords : Microcomputer, tutorial Web site, H8/3048

1. はじめに

本校ロボコンゼミ,組み込みマイスタープロジ ェクトの学生はマイクロコンピュータをコントロ ーラとして使うために、マイクロコンピュータに ついて課外で学んでいる。また情報工学科の学生 はコンピュータの動作原理を学ぶ正課授業があり, 単純なマイクロコンピュータを学んでいる。いず れにしても将来プリミティブな形で組み込みシス テムの開発にかかわる時に、マイクロコンピュー タ向けのプログラミングとその周辺知識は、バッ クグラウンドとして持っておきたい内容である。

一方,入手が容易である Renesas 社 H8 および SH2 シリーズを対象に,おもに本校ロボコンゼミ, 組み込みマイスターの学生が独習でマイクロコン ピュータ利用方法を習得できるチュートリアル Web サイトを 10 年間にわたり,作成してきた。 その一部は情報工学科のコンピュータの動作原理 を学ぶ科目の授業にも使われる正課の教材にもな っている。このチュートリアル Web サイト制作の 考え方と概要を報告する。

2. チュートリアル作成の考え方

次に示すような考え方に従って,チュートリア ルを作成してきている。

- (1) H8 シリーズには複数のコンパイラシステム が提供され混在するが,できるだけ,それぞ れのコンパイラシステムに対応すること
- (2) さまざまなコンパイラをユーザが使うときに、各チュートリアルは自分の開発環境でそのまま使えること(作る方はぜきるだけ多くの環境に対応させるため大変だが、使う側はありがたい)

- (3)最初は CPU の動作や API 関数がブラック ボックスだったとしても、必ず種明かしをし て、内容を正確に理解できるようにする教育 的配慮を行う
- (4) API 関数パーツとして,実用の場で使える ものを示すこと

3. 習得目標設定

各学習段階の学習者からどのようにマイクロコ ンピュータが見えて、どのような順番で学習して ゆくかは重要であり、各学習段階により、習得目 標を次のように定めた。

3.1 初心学習者向け

- (1)簡単なプログラムを PC (パソコン)上で作成し、コンパイルの後、転送プログラムでマイコンに転送し、マイコン上でそのプログラムを動作させる (マイコンを、ブートモード(プログラムの転送を受けるモード)とランモード(通常の動作モード)で動かすことができる)
- (2)通常のC言語の学習に近いが、プログラム からLEDの点灯消灯など外部機器の制御が 専用の関数呼び出しででき、時間稼ぎ関数で 点灯時間が制御できること
- (3) スイッチの状態を調べる関数が使え、状態 に応じた制御プログラムができる
- (4) インターバルタイマー割り込みの舞台裏は 判らないけれど、割り込みによって、定期的 に起動する関数の利用ができる
- (5) シリアル通信の舞台裏は判らないが,マイ コンからの通信を PC(パソコン)で受信し,

123

ターミナル画面に表示でき,双方向通信できること

(6) LED の PWM 駆動を行ない、同様な作業で 電熱器からモータまで制御できることを知 ること

3.2 初級学習者向け

- (1) マイコン起動時に実行される命令がメモリ 中のどこに書かれているべきかを知る
- (3)マイコンが起動時に行うべきことが記述されているスタートアップルーチンの存在を知る
- (4) スタートアップルーチンが行うべき内容を 知る。
 - 1) スタックポインタの初期化
 - 初期値を持つ静的変数が RAM 領域にお かれている状況で、初期値を ROM 領域 からコピー
 - 3) 初期値を持たない静的変数が RAM 領域 におかれ提示状況で、これらのクリア
 - 4) 必要に応じて IO の初期化
 - 5) ユーザの main 関数の呼び出し
- (5)割り込みを記述するためには、割り込みベクタが必要なこと、割り込み関数にはレジスタ退避復帰など通常の関数とは違う動作があること

3.3 中級者向け

- (1)機械語プログラムは PC (プログラムカウン タ)に従って動作すること、ジャンプ命令は PC (プログラムカウンタ)を操作して行わ れていること、サブルーチンコール命令、サ ブルーチン復帰命令はスタックを介した PC (プログラムカウンタ)を操作して行われて いること
- (2) スタックとスタックポインタの役割がわかること
- (3)割り込みとスタック操作により、タスクス イッチ動作が行えること
- (4)タスクスイッチの延長上にリアルタイム OS ができること
- (5) コンパイラ, リロケータブルオブジェクト, リンカの役割を知り, コンパイルシステムの 動作を理解し, どのような環境でもソースプ ログラムから実行形式に変換でき, マイコン に実行形式プログラムを送り込めること
- (6) リアルタイム OS (μ ITRON) を学ぶこと

3.4 一般向け

多重割り込み, PWM 駆動, 二相カウンタによるロータリエンコーダ, 多元 PWM 信号発生, ADC, DAC などの API 関数例を提示する。また赤外線

通信システム, Bluetooth 通信システムなども, そのままロボコンチームなどが使える状態で提示 する。(この部分は,ロボコンゼミ学生の支援で完 成している。)

4. コンパイルシステムのアレンジ

対象とするマイクロコンピュータは、現在のと ころ, Renesas 社の H8/3048f, H8/3048f-one, H8/3664, H8/3052f, H8/3069f, SH2/7025, SH2/7144 である。解説しているコンパイルシス テムは, H8 シリーズに向けては, Hitachi 評価版 コンパイラ Ver1, Ver2, H8 シリーズ用 GCC, H8 シリーズ用 HEW であり, また SH2 シリーズ 向けには, SH2 シリーズ用 GCC, SH2 シリーズ 用 HEW である。

コンパイル作業あるいはファイル転送作業に多 くの手数を費やすと、学習者は何回もの同じ作業 にうんざりしてしまう。そこで、コマンドライン 作業に向けては、コマンドファイルを作成し、学 習者がドラッグ&ドロップ1回またはダブルクリ ック1回でコンパイルから CPU への実行モジュ ール転送まで完遂できるシステムを提示した。ま た、このコマンドファイルを開いてみれば、何が 行われているのかもわかるようになっている。

この教材を制作した初期のころは,初心者向け に,コンパイラシステムを意識させたくなかった ので,設定ファイルやスタートアップルーチン, 割り込みの仕組み等は隠したコンパイル&転送コ マンドを提供し,学習者が自分で作成した C ソー スをコマンドアイコンにドラッグ&ドロップで実 行できる環境としたが,最近制作している教材で は積極的にスタートアップルーチンなどを見せて, 気づきを誘うようにしている。

なお HEW は統合環境なので,そのまま使うよ うにしている。

5. プログラム教材の特徴

Renesas 社はマモリマップト機能レジスタのア ドレスやビットの定義を構造体と共用体を使って スマートにまとめているヘッダを用意している。 これを用いることにより,アドレスやビットを直 接意識せず,ハードウェアマニュアルに従ったプ ログラミングが可能となっている。しかし,この ヘッダを用いてもなお,定型の初期化や,適当に 割り振られたポートを意識してのプログラムは苦 痛であるため,これらも隠す必要を感じ,ポート 名などを隠し,作業内容を名前に持つ API 関数群 を作成した。これは初心学習者を救う目的で開発 したものであるが,実はハードウェアを隠し,関 数化するプログラミングは,ハードウェアを隠し,関 数化するプログラミングは,ハードウェアを隠し,関 数化するプログラミングは,ハードウェアを隠し,関 数で書き 換えるだけで,大枠のプログラムはそのまま移植 できるメリットを持つプログラミングの例として も学習者に提示できるようになっている。

これらの API 関数群は, 通常ならば, ~.c と~.h のファイルとして作成し, ~.lib と~.h をユーザ に与えるべきものだが, 教材の中には学習者が内 容を見られるように~.h に関数すべてを記述し学 習者に与えるようにしているものと~.c, ~.h の ファイルを使った通常の形式のものがある。いず れにしても, #include <~.h>は, その位置に~.h が挿入されることを知れば, 学習者は容易に, API 関数群の所在を理解し, 関数ソースを見て, その 振る舞いを確認できるようになる。またこれらの 関数群は, 学習者に, 有用な関数の作り方を示す 手本にもなっている。

6. マイクロコンピュータ教材としての特徴

全体としてチュートリアル構造を持たせている。 最初はできるだけ、プログラミングのみを行わ せ、割り込み、シリアル通信を取り入れてゆく。 CPU ハードウェアとの兼ね合いを引き出しなが ら、割り込みの仕組み、割り込みを利用するプロ グラミング、スタートアップルーチンの役割、コ



ンパイラ・リンカによる実行形式モジュールの作 成へとより大きな構造を理解できるようにしてい る。

またアドバンスコースとして、C プログラムコ ードのアセンブリ言語への展開、モニタプログラ ムを利用した機械語命令の逐次実行、タスクスイ

			x
🗲 🕘 @ http://xythos.tokyo-ct.ac.jp/usr/kosaka/web/for_ 🗘 - 🗟 C 🗙 @ AKI-H8,	/3048F-ONE使	い方 × 👘 🖓 🖓	<u>ن</u>
ファイル(F) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(T) ヘルプ(H)			
🏠 ▼ 🗟 ▼ 🖃 🖶 ▼ ページ(P)▼ セーフティ(S)▼ ツール(O)▼ 🚱▼ 🔊 🕼			
2 特別バージョン 自分で割り込みを管理する初級者向け環境(TNC)	「マザーボ-	-ド)	-
ファイル/ソフトウェア (Evaluation software Ver.2対応)	ファイル	説明	
入門講座第1 設定されたバーソナルコンビュータでマイコン入門第1歩			
AKI-H8/3048F-ONEのCクロスコンバイラ環境でのはじめてのプログラミング	-	H8_3048fone_h8v2TNCT.html	
Windows上でクロスコンバイラ環境を用いてCプログラム作成からH8へのダウ ンロードまでを解説(独習向け)			
入門講座第2 設定されたバーソナルコンビュータでマイコン入門第2歩			
AKI-H8/3664fのCクロスコンバイラ環境でのプログラミングNov2002 Windows上でAKI-H8/3664f付属のクロスコンバイラ環境を用いてCプログラム LED, SCI, PWM信号発生, ADC, タイマ割り込みを解説(独習向け)	<u>samples.zip</u>	<u>H8-MB-</u> <u>Pro2LECfone_h8v2TNCT.html</u>	
入門講座第3 マイコンのビット出力(共通読み物)			
AKI-H8/3048のビット出力の使い方Mar2002 H8のビット出力を用いてLEDを点灯させたり,モータを制御するまでを解説 LEDの保護抵抗の考え方,トランジスタやFETをスイッチととらえる考え方 H型モータドライバ回路,H型モータドライバICを含む(独習向け)	-	<u>h8CPU_Output.html</u>	
入門講座第4 マイコンのビット入力(共通読み物)			
	-	<u>h8CPU_Input.html</u>	
マイコンによる制御ブログラム例			
	-	ADDAV2fone.html	
AKI-H8/3048ブログラム例Jan2003 ADCとDACを利用するプログラミング例(独習向け)			
マイコンによる制御ブログラム例 ロータリエンコーダ (インクリメンタルオプティカルロータリエンコーダ)			+
		® 100%	•

図 2 H8/3048f-one チュートリアル目次

ッチとリアルタイム OS へと展 開できるようになっている。

7. 実際の Web サイト

実際の Web サイトは図1のサ イト入口部に示すように使用 CPU 別になっており,共通事項 も各 CPU のページで見られる ようになっている。図 2 のよう に CPU ごと,開発環境ごとでの チュートリアルで学習できるよ うになっている。図 3 は H8/3048f-one チュートリアルの 一部であるが,写真付きでの, 説明は,学習者にとっては,自 分の使っている機器であること を確認しながら作業できるので, 安心感がある。

CPU ごとのページ構成は特定 のトピックを見たい学習者にと っては見づらいため,図1に示 すようにトピックごとの索引も 作られている。

8. 学習の観点から見た,統 合開発環境 HEW

統合開発環境 HEW を使って 学習したいと考える学生も増え てきているため, HEW も取り上 げている。統合開発環境 HEW は,システム開発者が細かなこ とに煩わされないでシステムを 開発する場合には使いやすいシ ステムである。一方,コンピュー タの動作を理解しようという学

習者から見ると,3つの点が隠されすぎている。 些細なことではあるが,

(1) スタックポインタの初期化がソースコー ドにはないが,実際には組み込まれている

(2)初期化されている静的変数領域の初期化 コピーは関数が呼ばれているが、その実態のソー スコードが隠されている

(3)割り込み関数の記述が非常に楽にできる が、割り込みベクトルを設定しているところが隠 されていて見えない(説明を聞けば納得できるの で、この点は大きな問題ではない)

の3点が、学習者には障害になると考えられる ため、最初に学習するときは、コマンドを用いる 教材が必要と考えている。



図 3 H8/3048f-one チュートリアルの一部

turnOffLed(0); /*LED0のOFF*/ turnOnLed(1); /*LED1のON*/

msecwait(1000);

3

٠ 📄

このWebサイトは卒業研究生とともにロボコン ゼミを立ち上げる時に,支援の目的で立ち上げた。 その後,卒業研究を支援し,ロボコンゼミや組み 込みマイスターグループへの支援になっている。 検索エンジンからもよくヒットするようで,大学 生や独学の技術者からも質問メールをいただくこ とや,解説書へのリンク許可依頼が来ることもあ る。現在このサイト内の複数のWeb 資料を授業に 引用し,有効に使うことができている。また学生 からの質問でリアルタイムに訂正し,追加説明を つけることができ,内容を豊富にしながら発展さ せているところである。

URL: http://xythos.tokyo-ct.ac.jp/usr/kosaka/ web/index.html

9. まとめ

(平成23年12月30日 受理)

€ 100%

マルチホップ移動体無線通信の一検討 一身近な通信システムを目指して-

田中 晶*

A Study on Immediate Mobile Multihop Communications

Akira TANAKA

Along with the popularization of Internet, communication systems become more familiar to our daily life. In such networked societies, meticulously improved mobility of communications is desirable. We developed a series of immediate mobile multihop communication systems that enable user-oriented communications: multihop uni-/multi-/broad-cast chat with smartphones, infrared multihop error correcting communication system, infrared multihop multi-/uni-cast switching system, multipath-problem solving function, and improved multihop routing with mobility-prediction/reduced procedures for UHF wireless systems.

Keywords : mobile multihop communications, routing, multicast

1. はじめに

重要な位置を占めるに至っている. ネットワークが する仕組みである. 社会に浸透して誰しもが容易に触れることができる **2.1 特徴** ようになったことで、身近に幾種もの通信システム な利便性の向上をはかることができる.大規模,或 クを構築できて,容易に通信を利用できる.また, ットワーク 1,2)は、このような目的に対して極めて有 効な技術である.これまでに、誰もが普段から目に する身近な通信媒体を対象にして,一連のマルチホ ップ移動体無線通信システムを提案・設計し、実験 と評価を行ったので、概要を報告する.

2. マルチホップ移動体無線通信システム

我々が利用している通信システムは,一般的には 図 1(i)に示すように,端末/携帯端末→ネットワー ク→端末/携帯端末,と情報が伝達され,端末から 発信されたデータは基地局や中継局、また、中継回 線などのネットワーク設備を経由して、相手先の端

末へ届けられる.一方,マルチホップ移動体無線通 インターネットや携帯電話が広く普及し,通信シ 信システムは,図 1(ii)のように,大規模/高度なネ ステムは産業においても日々の生活においても一層 ットワーク設備を経ずに,端末間だけで情報を伝達

本来中継装置が担う処理を、移動体である携帯端 を取り扱うことが日常化し、多くの人々に抵抗なく 末内で実行することになるので、高度な通信処理は 受け入れられるものとなってきた. このようなネッ 難しく, 限られた範囲の限定的な情報伝達が現実的 トワーク社会において、さらに一歩前進し、利用者 な適用領域となるが、身近な通信媒体や装置を用い が自らの周囲に簡易なネットワークを構築して自ら れば、マルチホップ移動体無線通信によって、誰で 操作することができれば、生活や産業において、様々も、いつでも、また、どこでも、自前のネットワー いは高度な中継局/基地局を用いること無く、端末 これまで短距離でしか通信が行えなかった方式であ 間だけでネットワークを構築し得るマルチホップネ っても,本稿でも述べるような諸課題を克服して比



Fig. 1 Mobile multihop communication

較的簡易に通信距離の延伸が可能となる.

2.2 実現システム

室所属学生(松野貴徳君, 天野祐樹君, 柳原誠広君, 山田拓馬君, 吉田圭佑君, 林裕太君, 加茂貴治君) は、携帯電話(スマートフォン)の Bluetooth を用 いたマルチホップ無線通信,誤り訂正符号を用いた 赤外線通信、赤外線スイッチング、マルチパス問題 解消方式、移動予測及び制御とデータ転送を一体化 して制御情報量を抑制した経路選択法等の、マルチ ホップ移動体無線通信の研究と実験システムの設計 を行なってきた. 何れも, 多くの人が普段から使用 している機器に基づきながらも, 信頼性や安定性が 確保され、身近な通信システムの実現に向けた大き なステップとなっている.

ニキャスト/マルチキャストスイッチング機能),

マルチパス問題解消方式,を備えた高信頼赤外線マ ルチホップ通信とマルチメディア化,5章で、マル チホップ通信で障害となる複雑さを回避する技術 として重要な経路選択法の概要について述べる.

3. 携帯電話の Bluetooth を用いたマルチホップ 無線通信

国内の携帯電話等の加入契約数は 1.2 億人を超 えている 3. その一方, 隣の建物や上下階にいる 人等の近くにいる人との通話も,一旦基地局を介し てネットワーク経由で行う. そこで, このようなネ ットワークリソースの無駄を軽減するため, Android OS を搭載した携帯電話機(スマートフォ ン)で、Bluetoothを用いたマルチホップ通信を行 う Bluetooth multihop cast (BMHC)方式を設計し, 実装して評価を行った4.本システムは、1対1通 信 (ユニキャスト) だけでなく, マルチキャスト, ブロードキャストで,携帯電話機だけを経由してマ ルチホップのチャットが行える.

BMHC では、主端末(送信元端末及びその端末か ら中継端末を2ホップ単位で連鎖的に指定)は、宛 先端末(1台或いは複数)のアドレスとホップ数を 指定し送信する.従端末(主端末から1ホップで接 続できる端末) はホップ数を調整し, (i)自ノードが 主端末となる従端末にデータを送信,(ii)自ノード が主端末となる従端末から宛先端末のアドレス探 索処理結果を受信し上記主端末に送信,(iii)宛先端

末のアドレス探索処理を行い、その結果を上記主端 末に送信する.送信要求においては,Bluetoothの1 これまで,著者,及び,本年度並びに昨年度研究 ホップ領域(1台の主端末と7台以下の従端末で構成 される星状のネットワーク)間の接続を切り替える 機能、及び、端末間接続の待機基準時間を共有する 機能を,ある領域間接続手順5に追加した.主端末が 結果受信後,(ii)での従端末を中継して,必要に応じ てこれを繰り返し、送信元端-中継端末(…/中継 端末) - 宛先端末のユニ/マルチ/ブロードキャス トのコネクションを確立する.図2に、上記(i)と(ii) 等も含む主端末内の主な処理を示す. さらに、テキ ストデータを送信するチャット機能を組み込んでお り(図3),スマートフォン間でタッチ入力によるチ ャットがマルチホップで行える.BMHCを用いれば, 既存の携帯電話ネットワークのみを用いたテキスト 3章で、携帯電話機による1対1/1対多(ユニキ メッセージ通信に比べてネットワークリソース使用 ャスト、マルチキャスト及びブロードキャスト)マ 量を約2%削減することができる. ネットワークシス ルチホップ通信,4章で,誤り訂正機能,方向制御(ユ テムは規模が大きいため,この値は十分有意な値で



Fig. 2 Process flow of BMHC in main terminal



Fig. 3 Chat screen on smartphone for BMHC

ある.

4. 高信頼赤外線マルチホップ通信4.1 誤り訂正符号の導入

無線通信は一般に長距離伝送に適した電波を用い ることが多いが、指向性が強く、また、そのために 秘匿性にも優れた光無線通信も多く研究されている. 中でも電磁波や照明等により乱されることが少ない 媒体である赤外線は, Infrared Data Association (IrDA),家電製品協会,企業独自方式等で規格化さ れ、多用されてきた.しかし、おおむね距離減衰が 大きく,誤り訂正は必須となる.例えば IrDA で採 用されている誤り制御方式は Cyclic Redundancy Check (CRC)と呼ばれる誤り検出符号であり、通信 路状況によっては再送要求が繰り返されて伝送レー トが低下してしまう.光無線で遠距離通信を試みる 場合,マルチホップ移動体通信方式は有効な手段に なり得る一方、伝送区間で受ける外乱に加えて処理 能力の低い中継機を多く経由することによっても誤 り率や遅延が増大する可能性が高い. そこで, 簡易 な方法により、マルチホップ赤外線通信の精度向上 を図ることとし, 誤り訂正符号を導入した試験機を 設計し、実験により同符号の赤外線通信における効 果を実証した 6).

マルチホップ無線通信では、本来送受信機であっ たものが中継をも行うため、追加する中継機能には 極力簡易な構造が求められる. そこで, 実装に容易 な畳み込み符号・ビタビ復号 7を採用した. 畳み込 み符号は、過去の入力情報を用いて現時点の符号化 情報を算出する.2個のシフトレジスタを用い,現 時点に対し2つ前の入力まで遡って符号化を行う. 畳み込み符号の復号にはビタビアルゴリズムを利用 する.このアルゴリズムは、最尤復号法の一種であ り、畳み込み符号化時にとり得る内部状態の遷移の 中から誤りビットを含む受信信号系列に最も近い系 列を出力する.送信/中継/受信機は, Field Programmable Gate Array (FPGA)である Cyclone Ⅲ8を用いて並列処理を実現し,設計に際して Quartus II 9の Viterbi Compiler を使用した. Viterbi Compiler の処理遅延は、シミュレーション値で 1024 ビットのデータに対して冗長性を加味した全 遅延の 6.9%と小さく、中継機に用いても問題は無い. 符号化/復号化は中継-受信において適用する.図 4 と図 5 に送信機のモジュール構成と作製した実験 機の写真を示す.

実験機を用いて 256 ビットのデータで距離を変え

た場合のエラービット数を実測した.符号使用時と 非使用時について,屋外の太陽光や日常的な屋内環 境として蛍光灯の通常使用時・消灯時と,異なる環 境のもとで測定している.

実験結果を図6に示す.一般に赤外線は自然光によ り影響を受け使用が制限されてしまうが,屋内での 通常使用環境として蛍光灯が点灯しているときや, 屋外において太陽光が存在しているときなど,雑音





Fig. 5 Experiment device



Fig. 6 Experimental result of infrared communication

の存在が考えられる場面において、作製した誤り訂 生活家電に適用することができる. 前節では内部の とが実証された.実験から、それぞれの環境におい される.また、この実験から屋外で太陽光下の環境 (PIC)マイコン 11)を用いて設計した. における通信距離は、符号化の有無いずれの場合も、 屋内環境における通信距離から約 60%短くなること が確認された. ここで, 屋外における改善率は屋内 で変調して送信 LED へ出力する基本構造を持つ. におけるものと比肩する値を示しており、符号化適 の屋外使用の可能性をも示すことができた.

4.2 方向制御:ユニキャスト/マルチキャストスイ ッチング機能

が不要であり、家庭用のリモコンなど、身の回りに るスタートビットの長さを判別し、異なる方向に向 非常に多く用いられている. 前節では信頼性の問題 けられて複数取り付けられた送信用 LED の適切な たが、さらに、強指向性(約 30 度)の反面、機器の ち上がり、立ち下がり時に発生する割り込みを PIC 方向に直接向ける必要があるといった指向柔軟性に が検出したら, スタートビットを受け取る時間で判 関する難点も、大いに改善が望まれている.そこで、別し、状態に応じた変調関数が呼び出される. マルチホップ中継の際に方向制御を行うスイッチン グ中継装置を設計し評価した 10. リモコンを自分の 信号波形である. 変調中に若干電圧低下が生じるも 近くにある赤外線中継機に向けてボタンを押すだけ のの, 商用リモコン-作製した中継機-作製した受 で、対象機器がどの方向にあったとしても、離れた 信機、の構成による実験でスイッチング送受信が正 位置にあったとしても、また、幾つ設置されていた しく動作することが確認された. なお、あわせて照 象機器を指定して遠隔操作ができるようになる. ま している. 一例として, 蛍光灯の点灯時の場合を図9 た、リモコンと対象機器の間に障害物がある場合で に示す. 白熱電球(60W,距離 10cm) 点灯時では 場合でも、これら操作は可能である. 使用した実験 蛍光灯でも 50ms 程度のノイズが生じ、約 1m 程度 用受光モジュールを実際の対象機器のモジュールにの距離でも同様に発生する. LED 照明ではノイズは 置き換えれば、エアコンやプロジェクタ等の多くの 見られない. 測定範囲内ではこれら新品の照明器具

正機能を持つ通信装置でビット誤り率が減少するこ 並列処理等の理由により端末を FPGA で作製したが, 実際に使われている家庭用リモコンを対象にする場 て、距離比にして屋内・蛍光灯下で9%、屋内・蛍光 合は、安価に実装することが望ましく、本スイッチ 灯消灯下で 3%, 屋外・太陽光下で 7%の改善が測定 ング中継装置は Peripheral interface controller

リモコンから受信した赤外線信号を受光素子で復 調した後、シュミットトリガでノイズを除去、PIC PIC では FPGA のような並列動作が実現しにくいた 用によって、従来実用性を得にくかった赤外線通信 め、特に変調等の主要部分については assembly language でコーディングして中継による処理遅延を 抑制している.また,発振子を外部に設けることで 内部発振を用いる場合に比べ約4割の遅延(約100 赤外線通信機器は、新たな配線や機器取り付け等 μs) に抑えた.制御対象の機器の種類によって異な と通信距離の短さ(家庭用赤外線通信で約8m)に対 ものを選択しスイッチングして送信する. 図7に示 し, 符号化とマルチホップ中継による解決法を述べ すように, 処理時間短縮のため, 受信した波形の立

図8は、周期信号を受信した時の中継器における としても, 個別に/或いは特定の複数をまとめて対 明器具が商用の赤外線リモコンに与える影響を調査 も、或いは、別の部屋に対象機器が設置されている 750ms 程度のノイズが生じる(消灯時も同様).12W



Fig. 7 Switching process

Signals **8** -- 21



Fig. 8 Waveform on relay terminal

Fig. 9 Effect of room light

点灯中にノイズは生じない.赤外線通信は,現在普 変化も共有されることになり,移動方向が予測でき 室内用途では有利な通信方法であることがわかる.

4.3 マルチパス問題の解消等による機能向上

一種のマルチパス問題が生じることがある. すなわ ち、中継機を経由すると内部処理によりわずかなが ら遅延して受信機に信号が到達するが,受信機が, 中継機からの信号だけでなく、送信機からの直接信 号をも強いレベルで受信してしまうと(図10上部の 機器配置のように複数の中継機から受信してしまう 場合も)、複数の同一信号を時間差をもってゴース ト状に受信し、正しくデータを受信できない場合が グループ化、RSSI 取得と共有、ブロードキャスト、 生じる. そこで、4.1節の送信/受信/中継機を利用 データ送受信と破棄される場合の電力で表わされる. して,このようなマルチパス問題解消機能の設計も 行っている¹²⁾. 図 10 の通信シーケンスに記したよう に. 中継機が二つ以上の同一データを受信した時に 待機する処理 A, 中継機に対して受信機が Ack (送 信成功信号)を送る処理 B,一定時間内に Ack を受 位であることがわかる. 信しなかった場合、待機していた中継機が受信機に 向けてデータ送信する処理 C, 等から構成される.

ホップチャットでマルチメディア転送を可能にする ため、細分画面の頂点を求める方法や、JPEG 等で 用いられる Discrete cosine transform (DCT)等を比 較検討し, 圧縮/テキスト変換&分割を組み込む設 計も行っている 13) (図 11).

5. マルチホップ移動体無線通信における経路選 択法

移動体を含めたマルチホップルーティングは、一 般に、端末が頻繁に移動するケース向きのリアクテ ィブ型、トラヒックが多いケース向きのプロアクテ ィブ型,両者の中間のハイブリッド型,の3種類の 分類で述べられることが多い. ハイブリッド型は, 幅広いケースに対応可能ではあるが、適応処理が必 要で、精度を追及するとアルゴリズムは複雑化する.

これらのルーティングを直接適用するのではなく, 受信信号状態を用いて事前に端末の位置をある程度 特定することで、経路選択時の負荷を低減できる 2). 信号状態として Radio signal strength indication (RSSI) を利用し、三角測量法に基づき、移動体3端 末によるグループ化と移動予測方法を検討した 14). 図 12 に示す三角形を構成する端末は、近隣端末の RSSI を共有し常時更新しており, 受信端末が右から 左へ移動すると、各頂点端末で検出される RSSI の

及しつつある LED 照明には影響されないことから、るので、予測結果に基づき範囲を限定した経路探索 が行える.より広い面での効果を確認するため、二 つの三角形が一端末で結合されているモデルを前提 これまでに述べてきたマルチホップ無線通信では,に,結合位置の端末の消費電力の計算を行った(式1).

E(joint term)	
= E(grouping)+8E(RSSI measuring)+	
2E(RSSI sharing)+3E(broad cast send)+	
2E(broad cast recv)+data-size• (data	
discard)+2E(data send&recv)	(1)

提案手法を導入すると、通信頻度がリアクティブ型 程度以下,或いは,プロアクティブ型1周期内に約 35回までであれば、プロアクティブ型以下の電力に 抑えられるため、経路探索効率が既存方式に比べ優

より直接的に経路選択を効率化するためには、ホ ップ数を限定すれば,データ送信と経路探索を一体 このほか、3 章で述べた携帯電話機によるマルチ 化することで、経路探索制御データ量を抑制する効 果が得られる 15). 対象となる領域において、電源が 最初に入った端末を中心端末とし、信号到達距離の 辺縁の重なりが小さい他端末を隣接する中心端末と する. 図 13 のように, 辺縁付近にある端末(準中心 端末)は、隣接中心端末との中継を行う.経路探索 範囲を、送信端末が属する中心端末からの信号到達 範囲、及び、隣接する複数の中心端末からの信号到 達範囲に限定し、送信範囲に中心端末を含むブロー ドキャストにコンテンツを含める手順によって、送 信端末→中心端末 或いは、送信端末→隣接中心端 末 間の経路探索を省略することができる. Nを隣 接端末数, αを宛先端末までの最小ホップ数とする と、従来からのアルゴリズムである Ad hoc on-demand distance vector (AODV)での経路探索に 要する制御データ量は、式2で表される.

$$R_{aodv} = N^{\alpha - 1} + \alpha N \tag{2}$$

一方,提案アルゴリズムでは,ホップ数3以下の範 囲では,式3となり,AODVに比較して優位である.

$$R = N + \alpha \qquad (\alpha \le 3) \tag{3}$$

現在、共有メモリを用いて本章の経路選択法を組 み込んだ UHF 帯の送受信中継機を, FGPA を使い 作製中であり、実証実験を進めている.



Fig. 10 Multipath provision



Fig. 11 Multimedia enabled chat



Sender

Fig. 12 Mobility prediction





Fig. 13 Integrated searches and data-send

6. むすび

携帯電話やインターネットの浸透により,ネットワ ーク社会やモバイル社会などと言われるようになっ て久しい.既存のネットワークの枠組みを利用する仕 組みは数多く存在しているが,局所限定的とはいえ自 分自身でネットワークを随意に構築しようとする試 みは、今後より発展が期待される分野であり、そこで は、端末間だけで通信が行えるマルチホップ移動体通 信は有力な技術である.研究室の学生諸君とともに, 現在急速に普及しつつあるスマートフォンを用いて マルチホップ移動体無線通信を実現し,また,マルチ ホップ通信で最重要課題となる,誤り訂正や遅延抑制 技術、方向制御技術、並びに、制御データ・消費電力 を抑制する経路選択技術を提案し,赤外線とUHF帯 特定小電力無線を用いて設計を行い,日常的な装置類 を対象とした実証実験にて提案技術の有効性を確認 した.マルチパス問題解消やマルチメディア化に向け た取り組みも行っている.本稿で述べた検討は、身近 な通信システムの実現に向けた一歩に過ぎず,さらに 高度化を目指して研究を進めている.

謝辞

本研究の一部は,東京工業高等専門学校の平成22 年度重点配分経費により行われた.

参考文献

- 田中晶, "マルチホップ無線通信におけるメモリ を用いたノード識別方式の一検討," 2011 年信学総 大, No. B-5-47, Mar. 2011.
- 2) 田中晶, "マルチホップ無線通信におけるノード 識別方式の一検討,2011 年信学ソ大(通信), No. B-5-87, Sep. 2011.
- 総務省, "電気通信サービスの加入契約数等の状況 (平成23年3月末),"総務省, Mar. 2011.
- 4) 柳原誠広, "携帯電話の Bluetooth を用いたマルチ ホップ無線通信の研究," 2010 年度東京工業高等専 門学校卒業論文, Mar. 2011.
- 5) 平田千浩, 二木志郎, 大島勝志, 三好匠, "Bluetooth におけるマルチホップブロードキャス ト方式の設計と実装,"信学技報, NS2005-199, pp.165-168, Mar. 2006.
- 6)山田拓馬, "誤り訂正符号を用いた赤外線通信機の 研究," 2010 年度東京工業高等専門学校卒業論文, Mar. 2011.
- 7) R. Morelos-Zaragoza, "Tutorial on

Convolutional Coding with Viterbi Decoding," http://pweb.netcom.com/~chip.f/Viterbi.html, Dec. 2001.

8) ALTERA, "CycloneIII FPGA Starter Kit User Guide,"

http://www.altera.co.jp/literature/ug/ug_ciii_starte r_kit.pdf, May 2010.

- ALTERA, "Quartus II Handbook Version 10.0," http://www.altera.co.jp/literature/hb/qts/quartusii _handbook.pdf, Jul. 2010.
- 10) 吉田圭佑, "赤外線中継器の研究," 2010 年度東京 工業高等専門学校卒業論文, Mar. 2011.
- 鈴木 美朗志, "PIC&C 言語でつくる赤外線リモコン," 電波新聞社, 2007.
- 12) 林裕太, "マルチホップ赤外線通信におけるマルチ パス問題の研究," 2011 年度東京工業高等専門学校 卒業論文, Mar. 2012. (予定)
- 加茂貴治、"携帯電話の Bluetooth を用いたマルチ ホップ通信におけるファイル転送の研究," 2011 年 度東京工業高等専門学校卒業論文, Mar. 2012.(予 定)
- 14) 松野貴徳、"移動予測を用いたマルチホップルーティングプロトコルの研究、"東京工業高等専門学校 専攻科機械情報システム工学専攻 2011 年度特別研究論文, Mar. 2012.(予定)
- 15) 天野祐樹, "マルチホップ無線通信における無階層 経路選択法の研究,"東京工業高等専門学校専攻科 機械情報システム工学専攻 2011 年度特別研究論文, Mar. 2012. (予定)

(平成24年1月6日 受理)

Development of Educational Simulation Tools for Science and Engineering

Ken-ichi TSUCHIYA¹⁾, Akira SEITOH²⁾ and Illka ALEKSI YLIOJA³⁾

Molecular dynamics (MD) is a powerful simulation tool for modern science and engineering. In this study, we have shown the proto-type MD application as an educational tool for the biginners. Rigid sphere model and Verlet method were used as theoretical foundations for the interacting or non-interacting many-particle systems. For the visualization tool, MS visual C++ was used.

Keywords : educational simulation tool, morecular dynamics, rigid shphere model, Verlet method

1 Introduction

By the recent development of nano-technology, the necessity of teaching MD to the beginner of science and technology has become higher and higher. However, it is very hard to prepare MD applications for all students in the class room because they are too expensive. Therefore, we have shown the method how to teach MD from the basic principle inexpensively.

The Verlet method [1] based on the finite difference method was used in the calculation of the time evolution. Firstly, many body system including non-interactiong rigid sphers in the one dimensional box was assumed for the calculation. And gradually, we developed it to the interacting many body system in the 3 dimensional box. On the surfaces of the box, we did not adopt the periodic boundary condition in order to reach the intuitive understanding. Therefore, the collision between a particle and a wall of the box was assumed to be the elastic collision without the loss of energy.

Using free version of MS Visual C++ as an integrated development environment, it is designed that the results are visualized on the display in real time. The movement of a particle was achieved by the iteration of draw-vanish-redraw.

2 Simulation for the Chargeless Rigid Sphere Molecules

Here, we show the simulation for the chargeless rigid sphere molecules moving in the 2 dimensional box. The molecules are assumed to be classical particles, whose velocities are changed only at the elastic collisions.

¹Department of Chemical Science and Engineering

²Department of Liberal Arts (Mathematics)

³Helsinki Polytechnic

2.1 Classical Mechanics

If the initial position, velocity and acceleration of a particle are defined as

$$\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0) \tag{1}$$

$$\mathbf{v}_0 = (v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z), \tag{3}$$

the position and the velocity of the particle at time t are written as

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \tag{4}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\alpha} t, \tag{5}$$

where **r** and **v** satisfy $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$. For the case of the uniform linear motion, the position of the particle at time t is written as

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 t,\tag{6}$$

where no force is applied to the particle because $\alpha = 0$.

2.2 Elastic Collision to the Wall

Firstly, we consider a particle in the 2 dimensional square box which is shown in Fig.1, and try to find the true collision point. The initial conditions are

$$\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0) \tag{7}$$

$$\mathbf{v}_0 = (a, b). \tag{8}$$

Before the first collision to a wall, the position of the particle is written as

$$\mathbf{r}(t) = (x(t), y(t)) \tag{9}$$

$$x(t) = x_0 + at \tag{10}$$

$$y(t) = y_0 + bt. \tag{11}$$

If we consider the mass point, the collisions are classified as the following four possibilities.

- (a) Collision to the left wall The collision time t_i satisfies $x(t_i) = x_0 + at_i = 0$, therefore $t_i = -\frac{x_0}{a}$.
- (b) Collision to the right wall The collision time t_r satisfies $x(t_r) = x_0 + at_r = L$, therefore $t_r = \frac{L-x_0}{a}$.
- (c) Collision to the upper wall The collision time t_u satisfies $y(t_u) = y_0 + at_u = L$, therefore $t_l = \frac{L-y_0}{b}$.
- (d) Collision to the downside wall The collision time t_d satisfies $y(t_d) = y_0 + at_d = 0$, therefore $t_l = -\frac{y_0}{a}$.

If we consider a sphere particle with radius r, the collision times are slightly different from the cases described above.



Fig. 1 Particle in a Box

- (A) Collision to the left wall The collision time t_i satisfies $x(t_i) = x_0 + at_i = r$, therefore $t_i = \frac{r-x_0}{a}$.
- (B) Collision to the right wall The collision time t_r satisfies $x(t_r) = x_0 + at_r = L - r$, therefore $t_r = \frac{L - r - x_0}{a}$.
- (C) Collision to the upper wall The collision time t_u satisfies $y(t_u) = y_0 + at_u = L - r$, therefore $t_l = \frac{L - r - y_0}{b}$.
- (D) Collision to the downside wall The collision time t_d satisfies $y(t_d) = y_0 + at_d = r$, therefore $t_l = \frac{r-y_0}{a}$.

In these possibilities, negative collision time corresponds to the past collision, which should be omitted. We should select the minimum collision time in the positive solutions. For the cases of the point P and Q in Fig.1, the collision times are negative. Therefore, we should omit them. For the cases of the point R and S, the collision times are positive. Comparing these two cases, t_r for the point R is smaller than t_u for the point S. Therefore, we should select the position R as the true collision point.

Secondly, we consider the elastic reflection of a particle at the collision point. Generally, the momentum parallel to the wall is conserved in the elastic reflection, because the mass of the wall can be regarded as infinite. On the other hand, the sign of the momentum perpendicular to the wall is reversed. For example, the reflection at the point R in Fig.1 converts the velocity as

$$\mathbf{v}_0 = (a, b) \longrightarrow \mathbf{v}'_0 = (-a, b), \tag{12}$$

because it is a collision to the right wall. The collision to the left wall also converts the velocity as eq.(12). The collisions to the upper and downside walls convert the velocity as

$$\mathbf{v}_0 = (a, b) \longrightarrow \mathbf{v}_0' = (a, -b). \tag{13}$$

After the first collision, we continue the same process again and again.

2.3 Collision between Two Particles

Here, we show the mathematical description of the elastic collision between the same particles. Generally, the instantaneous distance between the two particles at the collision equals the diameter of the particle. If the initial positions and velocities of the particle *i* and *j* are $(\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i)$ and $(\mathbf{r}_j, \mathbf{v}_j)$, it is written as

$$|(\mathbf{r}_i + \mathbf{v}_i t_{ij}) - (\mathbf{r}_j + \mathbf{v}_j t_{ij})| = d,$$
(14)

where t_{ij} and d mean the collision time and the diameter of the particle, respectively. This means that the relative distance of the two particles equals to the diameter of the particle at the collision. For the convenience, we define the relative distance and velocity as

$$\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j \tag{15}$$

$$\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j. \tag{16}$$

Using them, eq.(14) is rewritten as

$$|\mathbf{r}_{ij} + \mathbf{v}_{ij}t_{ij}| = d. \tag{17}$$

This equation leads to

$$\mathbf{r}_{ij}^2 + 2t_{ij}b_{ij} + t_{ij}^2\mathbf{v}_{ij}^2 = d^2, \tag{18}$$

where b_{ij} is defined as

$$b_{ij} = \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{v}_{ij},\tag{19}$$

and $\mathbf{r}_{ij}^2 = \mathbf{r}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij}$, $\mathbf{v}_{ij}^2 = \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{v}_{ij}$. We can regard eq.(18) as a quadratic equation for t_{ij} . Therefore, it is rewritten as

$$\mathbf{v}_{ij}^2 t_{ij}^2 + 2b_{ij} t_{ij} + \mathbf{r}_{ij}^2 - d^2 = 0,$$
(20)

whose solutions are

$$t_{ij\pm} = \frac{-b_{ij} \pm \sqrt{b_{ij}^2 - \mathbf{v}_{ij}^2 (\mathbf{r}_{ij}^2 - d^2)}}{\mathbf{v}_{ij}^2}.$$
 (21)

The positive real roots give future collision times, which are shown in Fig.2. In these two roots, the smaller root t_{ij-} gives real solution, while the larger root t_{ij+} gives ghost solution. The negative real roots give past solutions, which are shown in Fig.3.



Fig. 2 Future Collisions between the Particles i and j



Fig. 3 Past Collisions between the Particles i and j

The two particles moving along the same direction never collide with each other, which are shown in Fig.4. In this case, the discriminant $D = b_{ij}^2 - \mathbf{v}_{ij}^2(\mathbf{r}_{ij}^2 - d^2)$ in eq.(21) is negative. Therefore it gives imaginary collision time. In all roots described above, we should select t_{ij-} in Fig.2 as a real solution.



Fig. 4 The Two Particles Moving along the Same Direction

Finding the true collision between the two particles by using the method described above, the velocity converting process should be done. It is achieved in keeping with the law of momentum and energy conservations which are written as

$$m\mathbf{v}_i + m\mathbf{v}_j = m\mathbf{v}'_i + m\mathbf{v}'_j \tag{22}$$

$$\frac{1}{2}m\mathbf{v}_{i}^{2} + \frac{1}{2}m\mathbf{v}_{j}^{2} = \frac{1}{2}m\mathbf{v}_{i}^{\prime 2} + \frac{1}{2}m\mathbf{v}_{j}^{\prime 2}, \qquad (23)$$

where \mathbf{v} and \mathbf{v}' mean the velocities before and after the collisions, respectively. They are shown in Fig.5. In order to conserve momentum before and after the collision, the momentums along the vector \mathbf{d} should be exchanged while the momentums perpendicular to the vector \mathbf{d} should be conserved. If we define $\hat{\mathbf{d}} = \mathbf{d}/|\mathbf{d}|$ as the unit vector along \mathbf{d} , the components of the velocity along \mathbf{d} are written as $(\mathbf{v}_i \cdot \hat{\mathbf{d}})\hat{\mathbf{d}}$ and $(\mathbf{v}_j \cdot \hat{\mathbf{d}})\hat{\mathbf{d}}$. Therefore, the velocities after the collision are expressed


Fig. 5 Collision between Two Particles

as

$$\mathbf{v}_i' = \mathbf{v}_i - (\mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{d}})\hat{\mathbf{d}}$$
(24)

$$\mathbf{v}_{j}' = \mathbf{v}_{j} + (\mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{d}})\hat{\mathbf{d}},\tag{25}$$

where the components of the velocities along \mathbf{d} before the collision are exchanged. It is easy to show the momentum conservation by summing up the both sides of eq.(24) and eq.(25). It gives

$$\mathbf{v}_i + \mathbf{v}_j = \mathbf{v}_i' + \mathbf{v}_j',\tag{26}$$

which is consistent with eq.(22). We can also show the energy consevation by using eq.(24) and eq.(25). They give

$$\mathbf{v}_{i}^{\prime 2} + \mathbf{v}_{j}^{\prime 2} = \mathbf{v}_{i}^{2} - 2(\mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{d}})\mathbf{v}_{i} \cdot \hat{\mathbf{d}} + (\mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{d}})^{2}\hat{\mathbf{d}} \cdot \hat{\mathbf{d}} + \mathbf{v}_{j}^{2} + 2(\mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{d}})\mathbf{v}_{j} \cdot \hat{\mathbf{d}} + (\mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{d}})^{2}\hat{\mathbf{d}} \cdot \hat{\mathbf{d}}.$$
 (27)

As the unit vector $\hat{\mathbf{d}}$ gives $\hat{\mathbf{d}} \cdot \hat{\mathbf{d}} = 1$, eq.(27) is rewritten as

$$\mathbf{v}_{i}^{\prime 2} + \mathbf{v}_{j}^{\prime 2} = \mathbf{v}_{i}^{2} + \mathbf{v}_{j}^{2}.$$
 (28)

This corresponds to the energy conservation before and after the collision, which is consistent with eq.(23).

2.4 N-body Problem in a 2 Dimensional Box

In 2.2, collision between a particle and a wall was explained. In 2.3, collisions between two particles were explained. Here, we show the simulation algorithm for the system including N-particles in a 2 dimensional box. It is described as following steps.

- 1. Give the initial positions and velocities for all particles in the 2 dimensional box.
- 2. Calculate the collision times to the wall for all particles, and select the minimum one.
- 3. Calculate the collision times between two particles for all combinations, and select the minimum one.

- 4. Comparing the minima in the step 2 and 3, select the smaller one. It is the minimum time of the collision event in this system.
- 5. Move the all particles until the minimum time obtained in the step 4.
- 6. Do the collision operation. If the event happens on the wall, convert the velocity by using eq.(12) and eq.(13). If the event happens between the two particles, convert the velocities by using eq.(24) and eq.(25).
- 7. Return to the step 2. (After the enough iteration, stop the calculations.)

Moving the characters on the computer display is achieved by drawing, vanishing and drawing at near position. The command for the drawing is prepared by each application. The vanishing is done by superimposing the same color as the background onto the old character.

3 Simmulation for the Interacting N-particle System

In section 1, we showed the simulation for the non-interacting N-particle system, which can be regarded as the gas of the rigid body in a 2 dimensional box. Here, we show the simulation for the interacting N-particle system. For example, we treat the electron gas in a 2 dimensional box. In this system, the collisions between electrons will never happen because the repulsive Coulomb forces between electrons are extremely large for short distances. The forces between them change the velocities of the electrons even if the collisions do not occur.

3.1 Force between the Two Particles

If we define the pair wise interaction as $V(r_{ij})$ where r_{ij} is the distance between the particles *i* and *j*, the force between them is written as

$$\mathbf{f}_{ij} = -\operatorname{grad} V(r_{ij}). \tag{29}$$

For the case of two electrons whose charges are -e and distance is r, the interaction between them is written as

$$V(r) = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r},\tag{30}$$

where ε_0 is the permiability of the vacume. This gives the force between the two electrons as

$$\mathbf{f} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}},\tag{31}$$

where $\hat{\mathbf{r}}$ is the unit vector of the radial direction. This foece is repulsivily because all of the electrons have same charege -e.

The force applied to the particle i in the N-body system is expressed as the summation of the force from the other particles which is given by

$$\mathbf{F}_{i} = -\operatorname{grad}_{i} \sum_{i \neq j}^{N} V(r_{ij}), \qquad (32)$$

where $\operatorname{grad}_{i} = \mathbf{i}\frac{\partial}{\partial x_{i}} + \mathbf{j}\frac{\partial}{\partial y_{i}} + \mathbf{k}\frac{\partial}{\partial z_{i}}$. The movement of the particle *i* depends on the force \mathbf{F}_{i} . However, the many-body problem is fundamentally difficult because the movements of the other N-1 particles also depend on the movement of the particle *i*. They link each other. This is the reason why the general solution for N-body problem do not exist for $N \geq 3$. The molecurar dynamics gives approximate solution for the movement of the particles in the N-body systems.

4 Verlet Method

In Verlet method [1], the position of the particle is expanded into the power of the minute time Δt as

$$\mathbf{r}(t+\Delta t) = \mathbf{r}(t) + \frac{d\mathbf{r}(t)}{dt} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{d^2 \mathbf{r}(t)}{dt^2} (\Delta t)^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 \mathbf{r}(t)}{dt^3} (\Delta t)^3 + O(\Delta t)^4$$
(33)

$$\mathbf{r}(t - \Delta t) = \mathbf{r}(t) - \frac{d\mathbf{r}(t)}{dt} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{d^2 \mathbf{r}(t)}{dt^2} (\Delta t)^2 - \frac{1}{3!} \frac{d^3 \mathbf{r}(t)}{dt^3} (\Delta t)^3 + O(\Delta t)^4,$$
(34)

where $O(\Delta t)^4$ means the summation of the higher order terms than $(\Delta t)^3$. By using eq.(33) and eq.(34), we obtain

$$\mathbf{r}(t+\Delta t) + \mathbf{r}(t-\Delta t) = 2\mathbf{r}(t) + \frac{d^2\mathbf{r}(t)}{dt^2}(\Delta t)^2 + O(\Delta t)^4$$
(35)

$$\mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t-\Delta t) = 2\frac{d\mathbf{r}(t)}{dt}\Delta t + O(\Delta t)^3.$$
(36)

These equations are rewritten as

$$\mathbf{r}(t+\Delta t) = 2\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(t-\Delta t) + \frac{\mathbf{F}(t)}{m} (\Delta t)^2 + O(\Delta t)^4$$
(37)

$$\mathbf{v}(t) = \frac{\mathbf{r}(t+\Delta t) - \mathbf{r}(t-\Delta t)}{2\Delta t} + O(\Delta t)^2,$$
(38)

where \mathbf{F} , m, and \mathbf{v} mean force, mass and velocity, respectively. We can interpret eq.(37) as following. The position of a particle after Δt second is given by using position at present, position before Δt second and force at present. In mathematics, they are called finite difference methd whose accuracies depend on the omitted term $O(\Delta t)^n$. By the way, we can obtain the acceleration within the same approximation in eq.(38) as

$$\frac{\mathbf{F}(t)}{m} = \frac{\mathbf{v}(t + \Delta t/2) - \mathbf{v}(t - \Delta t/2)}{\Delta t} + O(\Delta t)^2.$$
(39)

This equation leads to

$$\mathbf{v}(t + \Delta t/2) = \mathbf{v}(t - \Delta t/2) + \frac{\mathbf{F}(t)}{m} \Delta t + O(\Delta t)^3.$$
(40)

As well as the interpretation of eq.(37), we can use eq.(40) for knowing the future velocity from the past and present data. From eq.(38), we also obtain

$$\mathbf{v}(t + \Delta t/2) = \frac{\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t} + O(\Delta t)^2.$$
(41)

This equation leads to

$$\mathbf{r}(t + \Delta t) = \mathbf{r}(t) + \mathbf{v}(t + \Delta t/2)\Delta t + O(\Delta t)^3.$$
(42)

We can use eq.(40) and eq.(42) alternately and update the position of the particle. This is called leap-frog method, because it is similar to the leaps of a frog.

It should be noted here that the force applied to a particle includes the all effects from the other N-1 particles in the N-particle system. In this case, eq.(40) and eq.(42) should be expressed as

$$\mathbf{v}_i(t + \Delta t/2) = \mathbf{v}_i(t - \Delta t/2) + \frac{\mathbf{F}_i(t)}{m} \Delta t + O(\Delta t)^3$$
(43)

$$\mathbf{r}_{i}(t+\Delta t) = \mathbf{r}_{i}(t) + \mathbf{v}_{i}(t+\Delta t/2)\Delta t + O(\Delta t)^{3},$$
(44)

where \mathbf{F}_i is a force applied to the particle *i*. It is defined as

$$\mathbf{F}_{i}(t) = \sum_{j \neq i} \mathbf{f}_{ij}(t), \tag{45}$$

where $\mathbf{f}_{ij}(t)$ is a pair wise force between the particle *i* and *j* at positions $\mathbf{r}_i(t)$ and $\mathbf{r}_j(t)$, respectively. In eq.(45), the summation over *j* should be performed with fixed *i*. In this summation, $j \neq i$ means the exclusion of j = i in order to avoid the self interaction. We should calculate $\mathbf{v}_i(t + \Delta t/2)$ and $\mathbf{r}_i(t + \Delta t)$ for $i = 1, 2, \dots, N$.

For the case of the Coulomb interacting electron gas, $\mathbf{f}_{ij}(t)$ is caluculated by eq.(31) with $r = |\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)|$ and $\hat{\mathbf{r}} = \{\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)\}/|\mathbf{r}_i(t) - \mathbf{r}_j(t)|$.

4.1 Simulation Algorithm

In the interacting N-body problem without any collisions, we do not need to find collision time between particles. It is a significant difference from the previous section. Here, we should only consider the collision between a particle and a wall. The algorithm for this chapter is summarized as following steps.

- 1. Give the initial positions and the velocities for all the particles in 2 dimensional box.
- 2. Calculate the forces applied to every particle by using eq. (45).
- 3. Calculate the new velocity of all particles by using eq.(43).
- 4. Calculate the new positions of all particles by using eq.(44).
- 5. If the collision between a particle and a wall is happen, do the collision operation by using eq.(12) and eq.(13).
- 6. Update the time by adding Δt and return to the step 2. (After the enough iteration, stop the calculations.)

4.2 Atomic Unit

For the microscopic calcullation, we usually use atomic unit based on the Bohr's quantum theory. In this theory, radius of the stable orbital, the tangential velocity and the binding energy of an electron bound to a hydrogen are quantized as

$$a_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2 \tag{46}$$

$$v_n = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 hn} \tag{47}$$

$$E_n = -\frac{me^2}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2}$$

$$(n = 1, 2, \cdots)$$

$$(48)$$

where *m* is the mass of electron. In atomic unit, physical quantities are measured in the unit of the ground state quantity. For example, the velosity **v** and the position **r** are normalized as $\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}/v_1$ and $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r}/a_1$. The time *t* is also normalized by the rotational period of the ground state electron, which is given by $t_1 = 2\pi a_1/v_1$, as $\tilde{t} = t/t_1$. The equations using in our calculation are normalized as

$$\tilde{\mathbf{v}}_{i}(\tilde{t} + \Delta \tilde{t}/2) = \tilde{\mathbf{v}}_{i}(\tilde{t} - \Delta \tilde{t}/2) + \tilde{\mathbf{F}}_{i}(\tilde{t})\Delta \tilde{t} + O(\Delta \tilde{t})^{3}$$
(49)

$$\tilde{\mathbf{r}}_{i}(\tilde{t} + \Delta \tilde{t}) = \tilde{\mathbf{r}}_{i}(\tilde{t}) + 2\pi \tilde{\mathbf{v}}_{i}(\tilde{t} + \Delta \tilde{t}/2)\Delta \tilde{t} + O(\Delta \tilde{t})^{3}$$
(50)

$$\tilde{\mathbf{F}}_{i}(\tilde{t}) = \sum_{j \neq i} \tilde{\mathbf{f}}_{ij}(\tilde{t}), \tag{51}$$

where the normalized pair wize force is defined for the electron pair as

$$\tilde{\mathbf{f}}_{ij}(\tilde{t}) = \frac{2\pi}{|\tilde{\mathbf{r}}_i(\tilde{t}) - \tilde{\mathbf{r}}_j(\tilde{t})|^2} \hat{\mathbf{e}}_{ij},\tag{52}$$

where $\hat{\mathbf{e}}_{ij}$ means the unit vector of the repulsive direction between the particles *i* and *j*. The unit vector is written as

$$\hat{\mathbf{e}}_{ij} = \frac{\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_j}{|\tilde{\mathbf{r}}_i - \tilde{\mathbf{r}}_j|}.$$
(53)

In these equations, physical quantities are translated into non dimensional quantities. The derivation of eq.(52) is written as

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \Delta t \frac{1}{v_1} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 a_1^2 \tilde{r}^2} t_1 \Delta \tilde{t} \frac{1}{v_1} = \frac{2\pi}{\tilde{r}^2} \Delta \tilde{t}.$$
(54)

The derivation of the second term of the right hand side in eq.(50) is written as

$$\frac{v\Delta t}{a_1} = \frac{v_1 \tilde{v} t_1 \Delta \tilde{t}}{a_1} = 2\pi \tilde{v} \Delta \tilde{t}.$$
(55)

5 3 Dimensional Simulations

When we show the results of 3 dimensional sumulations, the objects should be projected on the 2 dimensional computer display. Here, we consider the method how to translate the real coordinates (x, y, z) into the imaginary coordinates (x', y') on the display.



5.1 Perspective Projection

The concept of perspective projection is illustlated in Fig.6. In this method, a point object sitting on the point $Q(x_o, y_o, z_o)$ are viewed through the view plane from the view point $P(x_v, y_v, z_v)$. The line PQ penetrates the view plane at the point $Q'(x'_o, y'_o, d)$, where the parameter d is the distance between the view plane and the x - y plane. The equation for the line PQ is written as

$$\frac{x - x_v}{x_o - x_v} = \frac{y - y_v}{y_o - y_v} = \frac{z - z_v}{z_o - z_v}.$$
(56)

As the point $Q'(x'_o, y'_o, d)$ exists on the line PQ, the coordinates satisfy

$$\frac{x'_{o} - x_{v}}{x_{o} - x_{v}} = \frac{y'_{o} - y_{v}}{y_{o} - y_{v}} = \frac{d - z_{v}}{z_{o} - z_{v}}.$$
(57)

Therefore, we obtain

$$\begin{aligned}
x'_{\circ} &= \frac{d - z_{v}}{z_{\circ} - z_{v}} (x_{\circ} - x_{v}) + x_{v} \\
y'_{\circ} &= \frac{d - z_{v}}{z_{\circ} - z_{v}} (y_{\circ} - y_{v}) + y_{v}.
\end{aligned}$$
(58)

By using eq.(58), the 3 dimensional coordinates (x_o, y_o, z_o) are translated into the 2 dimensional coordinates (x'_o, y'_o) , which define the projected position onto the view plane.

This is just the method for a point object. For the case of the real object that has finite volume, we can use same procedure by regarding it as a set of point objects. For example, a tetrahedron can be regarded as a set of four points. If these four points are known, we can plot projected points on the view plane by using the method described above. We can recognize these points on the 2 dimensional view plane as a tetrahedron.

6 An Example of the Source Code

Now, we show an example of the source code for the Coulomb interacting N-particle system in the 3 dimensional box. This code was created on the Windows Form Application of MS Visual C++ 2010 Express [2]. The graphic commands used here were DrawLine and FillPie. DrawLine is a command for drawing a straight line from a point to another point. FillPie is a command for filling an ellipsoid with a color. Further details about them can be found in many websites.

```
Graphics^ g=e->Graphics;
double dt=0.5,a=250.0,d=a,xv=3.0*a,yv=4.0*a,zv=5.0*a;
int i,j,N=15; long n=0,nmax=100000,k,kmax=3000000;
double phi=2.0*acos(-1.0)/(double)N,tpi=2.0*acos(-1.0),R=6.0,R2=2.0*R
      ,A=1.5*R*(double)N
      ,X0=2.0*a/3.0,Y0=7.0*a/4.0,xg,yg,x[21],y[21],z[21],vx[21],vy[21],vz[21]
      ,r,F[21][21],ex[21][21],ey[21][21],ez[21][21],Fx,Fy,Fz
      ,X[8],Y[8],Z[8],Xp[8],Yp[8];
float Xg[8],Yg[8],fR2=(float)R2,fx[21],fy[21];
X[0]=0.0; Y[0]=0.0; Z[0]=0.0;
X[1]=a ; Y[1]=0.0; Z[1]=0.0;
X[2]=a ; Y[2]=a ; Z[2]=0.0;
X[3]=0.0; Y[3]=a ; Z[3]=0.0;
X[4]=0.0; Y[4]=0.0; Z[4]=a ;
X[5]=a ; Y[5]=0.0; Z[5]=a ;
X[6]=a ; Y[6]=a ; Z[6]=a ;
X[7]=0.0; Y[7]=a ; Z[7]=a ;
for(i=0;i<=7;i++)</pre>
   {Xp[i]=(a-zv)/(Z[i]-zv)*(X[i]-xv)+xv; Yp[i]=(a-zv)/(Z[i]-zv)*(Y[i]-yv)+yv;}
for(i=0;i<=7;i++)</pre>
   {Xg[i]=(float)(X0+Xp[i]); Yg[i]=(float)(Y0-Yp[i]);}
g->DrawLine(Pens::Blue, Xg[1],Yg[1],Xg[2],Yg[2]);
g->DrawLine(Pens::Blue, Xg[2],Yg[2],Xg[3],Yg[3]);
g->DrawLine(Pens::Blue, Xg[4],Yg[4],Xg[5],Yg[5]);
g->DrawLine(Pens::Blue, Xg[7],Yg[7],Xg[4],Yg[4]);
g->DrawLine(Pens::Blue, Xg[1],Yg[1],Xg[5],Yg[5]);
g->DrawLine(Pens::Blue, Xg[3],Yg[3],Xg[7],Yg[7]);
for(i=1;i<=N;i++){</pre>
    x[i]=a/2.0+A*cos(phi*(double)(i-1)); vx[i]=0.0;
    y[i]=a/2.0+A*sin(phi*(double)(i-1)); vy[i]=0.0;
    z[i]=a/2.0+10.0*pow(-1.0,i);
                                       vz[i]=0.0;}
while(n<=nmax)
   {
    n++;
    for(i=1;i<=N-1;i++){</pre>
        for(j=i+1; j<=N; j++) {</pre>
            r=sqrt((x[i]-x[j])*(x[i]-x[j])+(y[i]-y[j])*(y[i]-y[j])
                                              +(z[i]-z[j])*(z[i]-z[j]));
```

```
ex[i][j]=(x[i]-x[j])/r; ex[j][i]=-ex[i][j];
            ey[i][j]=(y[i]-y[j])/r; ey[j][i]=-ey[i][j];
            ez[i][j]=(z[i]-z[j])/r; ez[j][i]=-ez[i][j];
            F[i][j]=tpi/(r*r); F[j][i]=F[i][j];
                                                           }}
    for(i=1;i<=N;i++){</pre>
        Fx=0.0; Fy=0.0; Fz=0.0;
        for(j=1;j<=N;j++) if(i!=j)</pre>
           {Fx+=F[i][j]*ex[i][j]; Fy+=F[i][j]*ey[i][j]; Fz+=F[i][j]*ez[i][j];}
        vx[i]+=Fx*dt; x[i]+=tpi*vx[i]*dt;
        vy[i]+=Fy*dt; y[i]+=tpi*vy[i]*dt;
        vz[i]+=Fz*dt; z[i]+=tpi*vz[i]*dt;
        xg=X0+(d-zv)/(z[i]-zv)*(x[i]-xv)+xv; fx[i]=(float)(xg-R);
        yg=Y0-(d-zv)/(z[i]-zv)*(y[i]-yv)-yv; fy[i]=(float)(yg-R);}
    g->DrawLine(Pens::Black,Xg[0],Yg[0],Xg[1],Yg[1]);
    g->DrawLine(Pens::Black,Xg[3],Yg[3],Xg[0],Yg[0]);
    g->DrawLine(Pens::Black,Xg[0],Yg[0],Xg[4],Yg[4]);
    for(i=1;i<=N;i++)</pre>
        g->FillPie(Brushes::Black,fx[i],fy[i],fR2,fR2,360.0,360.0);
    g->DrawLine(Pens::Red,Xg[5],Yg[5],Xg[6],Yg[6]);
    g->DrawLine(Pens::Red,Xg[6],Yg[6],Xg[7],Yg[7]);
    g->DrawLine(Pens::Red,Xg[2],Yg[2],Xg[6],Yg[6]);
    for(k=0;k<=kmax;k++) ;</pre>
    for(i=1;i<=N;i++)</pre>
        g->FillPie(Brushes::White,fx[i],fy[i],fR2,fR2,360.0,360.0);
    for(i=1;i<=N;i++){</pre>
        if(x[i]<=R)
                     {x[i]=R; vx[i]=-vx[i];}
        if(x[i]>=a-R) {x[i]=a-R; vx[i]=-vx[i];}
        if(y[i]<=R) {y[i]=R; vy[i]=-vy[i];}
        if(y[i]>=a-R) {y[i]=a-R; vy[i]=-vy[i];}
        if(z[i]<=R) {z[i]=R; vz[i]=-vz[i];}
        if(z[i]>=a-R) {z[i]=a-R; vz[i]=-vz[i];} }
   }
for(i=1;i<=N;i++)</pre>
    g->FillPie(Brushes::Black,fx[i],fv[i],fR2,fR2,360.0,360.0);
```

7 Conclusion

We have shown an example of the lecture for the beginner of the computational science. Using this example, we can conduct classes without depending on the commercially released softwares.

Acnowledgement

Some parts of this study were done by getting a finantial suport in 2010 priority isuue of tnct. We wish to thank the president of tnct.

References

- 1. L.Verlet, Phys.Rev.159(1967)98
- 2. http://www.microsoft.com/japan/msdn/vstudio/express/

(Received Jan. 6, 2012)